

Eero Kaaja

ABSOLUUTTISEN TAIVASTAUSTAN MÄÄRITTÄMINEN KUVANTAVILLA SEN- SOREILLA MWIR-AALLONPITUUSKAIS- TALLA

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Diplomityö
Kesäkuu 2019

TIIVISTELMÄ

Eero Kaaja: Absoluuttisen taivastaustan määrittäminen kuvantavilla sensoreilla MWIR-aallonpituuskaistalla
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Materiaalitekniikka
Kesäkuu 2019

Kaikki kappaleet emittoivat sähkömagneettista säteilyä, jonka voimakkuus ja aallonpituusjakauma riippuvat kappaleen lämpötilasta. Normaaleissa maanpinnan olosuhteissa suurin osa tästä säteilystä on näkyvää valoa pidemmän aallonpituuden omaavaa termistä infrapunäsäteilyä, jota voidaan havaita mm. kuvantavilla infrapunasensoreilla, tai infrapunakameroilla.

Termisen infrapunakameran ulostulosignaalin suuruuteen vaikuttavat monet muutkin tekijät kuin kohteesta tai taustasta lähtöisin olevan säteilyn voimakkuus. Tästä syystä mittaustulosten tulkinta on usein haastavaa. Kvalitatiivisten mittausten suorittaminen on varsin yksinkertaista ja tarkkoihin mittaustuloksiin päästään, kunhan kamera on kunnollisesti kalibroitu ennen mittauksia. Mitatusta kohteesta tai taustasta peräisin olevan säteilyn absoluuttisen voimakkuuden määrittäminen on kuitenkin hyvin haastavaa. Pääasiallinen syy tähän on se, että kameran ilmaisimelle päättyy merkittävä määrä kameran komponenteista emittoitunutta säteilyä, joka sisältyy kameran havaitsemaan signaaliin. Tällaista säteilyä kutsutaan loissäteilyksi ja sen voimakkuus vaihtelee riippuen erityisesti kameran rungon lämpötilasta. Täten, jos kohteen absoluuttinen signaali tahdotaan selvittää, on myös loissäteilyn määrä selvitettävä.

Loissäteilyn määrän selvittäminen etenkin kenttämittauksissa on jatkuvasti vaihtelevien olosuhteiden takia hyvin haastavaa. Tämän diplomityön tavoitteena oli tutkia eri menetelmien soveltuvuutta signaalin nollatason selvittämiseen sekä kehittää yksinkertainen kalibrointiprosessi, joka soveltuisi käytettäväksi kenttämittauksissa.

Työssä keskityttiin erityisesti tutkimaan kuinka tarkkoihin mittaustuloksiin päästään, jos signaalin nollatasoa, eli signaalin osuutta, joka koostuu loissäteilystä ja muusta kohinasta, arvioidaan mittaamalla koveran kultapinnoitetun peilin kautta kameran erittäin kylmää ilmaisinta. Tavoitteeseen pyrittiin tutustumalla alan kirjallisuuteen sekä kattavalla kokeellisella osuudella, jossa suoritettiin suuri määrä erilaisia radiometrisiä mittauksia jäähdytetyllä MWIR-kaistan infrapunakameralla.

Työn tulosten perusteella peilin avulla ei kyetä määrittämään nollatasoa riittävällä tarkkuudella, jotta absoluuttinen taivastausta kyettäisiin määrittämään riittävän tarkasti. Syynä tähän on loissäteilyn määrän kasvaminen peiliä mitatessa, mikä johtuu pääasiassa kameran komponenttien emittoiman säteilyn heijastumisesta peilin kautta ilmaisimelle. Lupaavin ratkaisu absoluuttisten mittausten suorittamiseen on tunnetun ympäristön lämpöisen verrokin mittaaminen jokaisen kenttämittauksen yhteydessä.

Avainsanat: MWIR, infrapunakamera, kalibrointi, taivastausta, radianssi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Eero Kaaja: Determining absolute sky background by using imaging sensors in MWIR-wavelength band
Master's thesis
Tampere University
Materials science
June 2019

All bodies emit electromagnetic radiation, whose intensity and spectrum depends on the temperature of the body. In normal terrestrial conditions most of this radiation is thermal infrared radiation which has considerably longer wavelength compared to visible light. Thermal infrared can be detected by infrared sensors such as infrared cameras.

The output signal of an infrared camera is affected by many other factors in addition to the actual intensity of the radiation from the target and its background. Therefore, interpreting the measured results can be highly challenging. Performing qualitative measurements is rather straight forward and accurate results can be obtained if the camera has been properly calibrated before the measurements. However, determining accurate absolute intensities of the radiation from the target or its background is highly challenging. The main reason for this challenge is radiation from the camera components, which ends up in the detector and is included in the signal. This type of radiation is known as parasitic radiation and its intensity varies with the conditions, especially the temperature of the camera. Consequently, if one needs to determine the absolute signal from the target or background, the amount of parasitic radiation must be determined.

Determining the intensity of parasitic radiation is highly demanding especially in field measurements, since the conditions change consistently and there is often no time to wait for the camera to stabilize. The goal of this thesis is to examine potential methods for determining the zero background and in an ideal scenario also develop a simple calibration process which can be utilized in field measurements.

This work is focused on studying how accurately the zero-background, which is the part of the signal which consists of the parasitic radiation and the signal from other sources of noise, can be determined by measuring the reflection of the extremely cold detector of the camera from a gold-coated concave mirror. In order to reach the goal of this work, a brief literature review was performed, but the main focus was in an extensive experimental phase, which included a high number of radiometric measurements in various conditions with a cooled infrared camera operating in the MWIR-wavelength band.

The results of this thesis show that the mirror can not be utilized to determine the zero-background with high enough accuracy in order to reliably determine the absolute sky background. The reason for this is that some radiation from the camera is reflected from the mirror to the detector, which increases the amount of parasitic radiation in relation to measuring the target. The most promising method for determining accurate absolute sky background is to measure a high emissivity ambient temperature reference source during every field measurement.

Keywords: MWIR, infrared, calibration, sky background, radiance

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty yhteistyössä Puolustusvoimien tutkimuslaitoksen (PVTUTKL) kanssa. Haluan syvästi kiittää työni ensimmäisenä tarkastajana toiminutta TkT Tapio Sorvajärveä hänen tarjoamastaan asiantuntevasta ohjauksesta ja tuesta sekä ylipäänsä mahdollisuudesta tehdä tämä mielenkiintoinen diplomityö PVTUTKL:lle. Tahdon kiittää työni toista tarkastajaa professori Mika Valdenia hänen tarjoamastaan ohjauksesta.

Tämän diplomityön tekeminen on ollut haastava projekti ja jouduin sitä tehdessäni opettelemaan todella paljon uutta. Työskentely ja uuden oppiminen oli kuitenkin hyvin mielekäästä ja palkitsevaa, sillä työn aihe ja aihepiiri olivat hyvin mielenkiintoisia.

Tahdon kiittää minua työni tekemisessä avustaneita henkilöitä. Erityisesti tahdon kiittää äitiäni lab.mest. Anne Kaajaa, joka jo kauan aikaa sitten mahdollisti yhteistyöni alkamisen PVTUTKL:n kanssa yläasteen työelämään tutustumisen muodossa. Tämä yhteistyö sai jatkoa kandidaatintyöni muodossa ja huipentui ainakin toistaiseksi tähän diplomityöhön. PVTUTKL:n henkilöstöstä tahdon kiittää myös TkT Jaakko Saarelaa ja TkT Paavo Raerinnettä heidän tarjoamistaan neuvoista sekä tekn.yo. Arttu Tupalaa, lab.mest. Sirpa Vesalaista ja lab.mest. Pasi Salosta heidän tarjoamastaan avusta mittausten suorittamisessa. Lisäksi tahdon kiittää aiemmin kanssani TTY:n pintatieteiden tutkimusryhmässä työskennellyttä DI Lauri Palmolahtea hänen tarjoamistaan neuvoista sekä nykyistä esimiestäni DI Antti Markkulaa hänen joustavuudestaan tätä työtä kirjoitettaessa.

Tahdon kiittää tyttöystävääni Rebekkaa hänen tarjoamastaan tuesta työtä tehdessäni sekä isääni Jaria joustavuudesta mökinrakennusprojektissa. Tahdon kiittää myös muita läheisiäni heidän tarjoamastaan tuesta.

Tampereella, 16.06.2019

Eero Kaaja

SISÄLLYS

1. JOHDANTO	1
2. TEORIA	3
2.1 Sähkömagneettinen säteily	3
2.2 Radiometria	6
2.3 Mustan kappaleen säteily	8
2.4 Ilmakehän vaikutus säteilyn etenemiseen	12
3. KUVANTAVA RADIOMETRIA INFRAPUNA-ALUEELLA	16
3.1 Infrapunakameroiden suorituskyvyn keskeiset parametrit	17
3.2 Kuvantavan infrapunasektorin rakenne ja toimintaperiaate	19
3.2.1 Ilmaisintyytit	23
3.2.2 FLIR SC7600 -sarjan infrapunakamera	26
3.3 Kameran havaitsema signaali	27
3.3.1 Kameralle päätyvä signaali	28
3.3.2 Kohina	30
3.3.3 Loissäteily	32
3.4 Kalibrointiprosessi	34
3.4.1 NUC	34
3.4.2 Kvantitatiivinen kalibrointi	36
3.4.3 Kalibroinnin luotettavuuden haasteet	39
3.5 Infrapunakameroiden sovelluskohteita	42
4. MENETELMIÄ ABSOLUUTTISEN SIGNAALIN MÄÄRITTÄMISEEN	44
4.1 Kovera metallipinnoitettu peili	44
4.2 Verrokkisäteilijä	51
5. MITTAUSTEN SUORITTAMINEN JA MITTAUSTULOKSET	54
5.1 Kameran toiminnallisuuteen liittyvät mittaukset	54
5.1.1 Mittaus peilistä ja tunnetuista verrokkeista	55
5.1.2 Mittaukset eri integrointiajoilla	58
5.2 Hallitut kylmän olosuhteen mittaukset	61
5.2.1 Peilin ja tunnettujen verrokkien herätteiden vertailu kylmällä ja lämpimällä infrapunakameralla	61
5.2.2 Peilin lämpötilan vaikutus ulostulosignaaliin	62
5.2.3 Kameran rungon lämpötilan vaikutus ulostulosignaaliin	64
5.2.4 Absoluuttisten signaalien määrittäminen tunnetun verrokkisäteilijän avulla	67
5.2.5 Kameran lukukohinatason määrittäminen	68
5.3 Absoluuttisen taivastaustan määrittäminen kenttäolosuhteissa	72
6. TUTKIMUSTULOSTEN ANALYYSINTI	81
6.1 Mittaustarkkuuden arviointi määritettäessä absoluuttisia radiansseja koveran peilin avulla	81
6.2 Absoluuttisen taivastaustan määrittäminen	85
6.3 Suosituksia kenttämittauksiin	86
6.4 Jatkotutkimustarpeet	88
7. YHTEENVETO	90
8. LÄHTEET	92

LYHENTEET JA MERKINNÄT

A	poikkeama
$a_{n,m}$	ilmaisinelementin vasteen korjauskerroin
B	magneettikenttä
$b_{n,m}$	ilmaisinelementin poikkeaman korjaustermi
c	valonnopeus, $c = 299792458$ m/s
E	sähkökenttä, irradianssi
e	Neperin luku
D	ilmaisevuus
D^*	normitettu ilmaisevuus
h	Planckin vakio, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js
I	kulmaintensiteetti
k	Boltzmannin vakio, $k = 1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K
kk	kohteesta sensorille saapuvan radianssin L_k ja sensorin antaman digitaali-lukuarvon DL suhde
L	radianssi
$L_{k\lambda}$	kohteen lämpöisen mustan kappaleen säteilijän emittoiman säteilyn spektraalinen radianssi
M	Säteilyvoimakkuus
Q	säteilyn energia
q	elektronin varaus, $q = -1,602 \cdot 10^{-19}$ C
R	kameran vaste
R_v	kameran jännitteellinen vaste
R_λ	ilmaisimen spektraalinen vaste
r	heijastussuhde, heijastavuus
r_k	kohteen heijastavuus
$S_{n,m}$	ilmaisinelementin eteenpäin lähettämä signaali
S_λ	ilmaisimen havaitsema signaali
sr	steradiaani
t	aika
T	lämpötila
T_{bb}	mustan kappaleen säteilijän pintalämpötila
T_i	ilman lämpötila
T_k	kohteen pintalämpötila
T_p	peilin pintalämpötila
T_y	ympäristön lämpötila
$T\&K$	tutkimus ja kehitys
V_n	kohinan aiheuttaman jännitteen neliöllinen keskiarvo
V_s	säteilyn aiheuttaman sähköisen signaalin jännitteen neliöllinen keskiarvo
α	absorptiosuhde
ε	emissiivisyys
ε_k	kohteen emissiivisyys
ε_λ	kohteen spektraalinen emissiivisyys
λ	aallonpituus
λ_m	emittoidun säteilyn tehon huippukohdan aallonpituus
η	kvanttitehokkuus
σ	Stefan-Boltzmannin vakio, $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8}$ W/(m ² K ⁴)
Ω	avaruuskulma
ϕ	säteilyvuo
ϕ_k^{bb}	kohteen lämpöisen mustan kappaleen säteilijän emittoima säteilyvuo
ϕ_i	ilman emittoima säteilyvuo
ϕ_{kam}	kameralle saapuva säteilyvuo
ϕ_y	ympäristön säteilyvuo

τ	läpäisysuhde, läpäisevyys
τ_i	ilman läpäisevyys
$\tau_{i\lambda}$	ilmakehän spektraalinen läpäisevyys
$\tau_{(l+s)\lambda}$	linssin ja suotimen yhdistetty spektraalinen läpäisevyys
$\bar{\tau}_i$	ilmakehän optinen paksuus
ν	taajuus
$\tilde{\nu}$	aaltoluku
BP	eng. <i>Band-Pass</i>
CCD	eng. <i>Charge Coupled Device</i>
CMOS	eng. <i>Complementary-Metaloxide-Semiconductor</i>
DL	digitaalilukuarvo (kameran ulostulofunktion arvo)
FDRA	Puolustusvoimien tutkimuslaitos eng. <i>Finnish Defence Research Agency</i>
FIR	kaukoinfrapuna, eng. <i>Far Infrared</i>
FPA	ilmaisimatriisi, eng. <i>Focal Plane Array</i>
IR	infrapuna
IT	integrointiaika
LP	eng. <i>Long-Pass</i>
LWIR	pitkäaaltoinfrapuna, eng. <i>Long Wavelength Infrared</i> (6 – 15 μm)
MCT	elohopea-kadmium-telluridi -puolijohdemateriaali, eng. <i>Cadmium Mercury Telluride</i>
MWIR	keskiaaltoinfrapuna, eng. <i>Medium Wavelength Infrared</i> (3 – 6 μm)
NDT	materiaalia tuhoamaton testaus, eng. <i>Non-Destructive Testing</i>
NEP	ekvivalentti kohinateho, eng. <i>Noise Equivalent Power</i>
NETD	kohinaekvivalentti lämpötilaero, eng. <i>Noise Equivalent Temperature Difference</i>
NIR	lähi-infrapuna, eng. <i>Near Infrared</i> (0,78 – 1 μm)
NUC	eng. <i>Non-Uniformity Correction</i>
ND	eng. <i>Neutral Density</i>
PVTUTKL	Puolustusvoimien tutkimuslaitos
QWIP	kvanttikaivo infrapunafotoilmaisim, eng. <i>Quantum Well Infrared Photodetectors</i>
ROIC	lukupiiri, eng. <i>Readout Integrated Circuit</i>
SP	eng. <i>Short-Pass</i>
SNR	signaalin ja kohinan suhde, eng. <i>Signal to Noise Ratio</i>
SWIR	lyhytaaltoinfrapuna, eng. <i>Short Wavelength Infrared</i>
UV	ultravioletti
VIS	näkyvä valo, eng. <i>Visible light</i> (0,40 – 0,78 μm)
VLWIR	hyvin pitkäaaltoinen infrapuna, eng. <i>Very Long Wave Infrared</i> (15 – 30 μm)

1. JOHDANTO

Kaikki absoluuttista nollapistettä lämpimämmät kappaleet emittoivat infrapunasäteilyä. Emittoitujen säteilyn voimakkuus ja aallonpituusjakauma riippuvat kappaleen pintalämpötilasta: lämpimät kappaleet emittoivat enemmän säteilyä. Infrapunasäteilyä voidaan havaita ja mitata infrapunasensoreilla. Kuvantavat infrapunasensorit, tai infrapunakamerat, on kehitetty toisen maailmansodan loppupuolella. Syynä niiden kehittämiseen on ollut omien joukkojen havainnointikyvyn parantaminen etenkin pimeällä. Vielä muutama vuosikymmen sitten infrapunasensorit olivat käytössä lähinnä sotilaspuolen sovelluksissa, mutta nykyään niitä on käytössä hyvin laajalti myös kaupallisissa sovelluksissa niin teollisuudessa, pelastustoiminnassa, kulkuneuvoissa kuin jopa kotien tarve-esineissä. [1] Teknisen kehityksen ja uusien materiaalien myötä infrapunasensoreiden hinta on laskenut hyvin merkittävästi. [2, s. 647].

MWIR-aallonpituusalueen (keskiaaltoinfrapuna, aallonpituus 3 – 6 μm) kuvantavia sensoreita käytetään mm. ilmatorjuntaohjusten hakupäissä, joiden avulla ohjus hakeutuu maaliinsa. MWIR-aallonpituusalue soveltuu erityisen hyvin tähän tarkoitukseen, sillä ilma-alusten suihkumoottorit emittoivat kyseisen aallonpituusalueen säteilyä hyvin voimakkaasti. Huoneenlämpöiset ja etenkin lämpötilaltaan pakkasasteilla olevat kohteet puolestaan emittoivat MWIR-alueen säteilyä vain hyvin alhaisia määriä. Tällöin kontrasti kiinnostuksen kohteena olevan ilma-aluksen ja sen taustan välillä on korkea.

Kuten kaikki muutkin kappaleet, myös infrapunakameran komponentit, kuten linssit ja sisäiset rakenteet, emittoivat infrapunasäteilyä. Osa tästä säteilystä päätyy kameran ilmaisimelle ja summautuu kohteesta peräisin olevaan signaaliin. Tällaista säteilyä kutsutaan loissäteilyksi ja sen määrä riippuu etenkin kameran komponenttien lämpötilasta. Loissäteilyn määrän vaihtelu aiheuttaa signaalin nollatason vaihtelua. Nollataso vastaa signaalitasoa, joka saataisiin mitattaessa kohdetta, joka ei emittoi tai heijasta lainkaan termistä säteilyä. Se koostuu ainoastaan eri kohinalähteistä, lukukohinasta, pimeävirrasta ja loissäteilystä, aiheutuvista signaalin komponenteista. Nollatason vaihtelu aiheuttaa mittausepätarkkuutta, koska sen osuutta kameran ulostulosignaalista on haastavaa määrittää ilman kattavia mittauksia. Mittausepätarkkuuden vaikutus on suuri etenkin mitattaessa kohteita tai taustaa, joiden herätteet ovat hyvin matalia. Esimerkiksi taivaan heräte kovalla pakkasella on erittäin matala. Erityisen haastavaksi tilanteen tekee se, että kenttämittauksissa olosuhteet ja täten myös loissäteilyn määrä vaihtuvat jatkuvasti.

Tämän diplomityön tavoitteena on kehittää ratkaisu absoluuttisen signaalin määrittämiseen riittävällä tarkkuudella etenkin mitattaessa kohteita tai taustaa, joiden MWIR-aallonpituusalueella emittoiman säteilyn määrä on hyvin vähäinen. Tarkoituksena on tukea ilma-alusten omasuojan kokeellista ja teoreettista tutkimusta. Kyky määrittää taivastaustan sekä muiden kohteiden emittoiman säteilyn absoluuttinen määrä on osa tähän tutkimukseen liittyvää kokonaisuutta.

Tarkoituksena on kehittää kalibrointimenetelmä, joka kyetään suorittamaan aina mittauksen yhteydessä ja jonka avulla kyetään määrittämään taivastaustan heräte riittävän tarkasti. Parhaassa tapauksessa signaalin tarkka nollataso kyetään selvittämään. Vaatimus kehitettävälle kalibrointiprosessille on, että se ei perustu laajaan skaalaan kerralla suoritettavia mittauksia, vaan on mahdollisimman yksinkertainen ja nopeasti suoritettavissa kenttäolosuhteissa koulutetun henkilöstön toimesta. Mahdollisia menetelmiä signaalien absoluuttisten arvojen määrittämiseen ovat kalibroinnin suorittaminen joko kuvaamalla hyvin matalaherähteistä verrokkia, jonka MWIR-kaisalla emittoiman säteilyn voimakkuus on liki nolla, tai kuvaamalla yhtä tai useampaa verrokkikohdetta, joiden herätteen voimakkuus tunnetaan riittävän tarkasti, jotta muiden signaalien voimakkuudet kyetään määrittämään niiden avulla.

Työn tavoitteeseen pyritään tutustumalla alan kirjallisuuteen ja muihin julkaisuihin sekä työn kokeellisella osuudella, johon kuuluu radiometristen mittausten suorittaminen jäädytetyllä MWIR-kaistan infrapunakameralla vaihtelevissa olosuhteissa. Mittaustulosten perusteella arvioidaan eri ratkaisuehdotusten toimivuutta. Lisäksi pyritään karakterisoimaan työssä käytetyn infrapunakameran toiminnallisuuteen liittyviä ominaisuuksia ja niiden vaikutuksia mittaustuloksiin sekä kehittämään mittausjärjestely, jota käyttämällä kyetään suorittamaan taivastaustamittauksia mahdollisimman yksinkertaisesti ja hyvällä toistettavuudella.

2. TEORIA

Kaikki absoluuttista nollapistettä lämpimämmät kappaleet emittoivat sähkömagneettista infrapunasäteilyä, jota kyetään havaitsemaan infrapuna-alueella toimivilla sensoreilla. Tässä luvussa käsitellään sähkömagneettista säteilyä, erityisesti infrapunasäteilyä, ja siihen liittyviä fysiikan lakeja.

2.1 Sähkömagneettinen säteily

Sähkömagneettinen säteilyspektri sisältää laajan kirjon säteilyä, jonka ominaisuudet ja vuorovaikutus materian kanssa riippuvat vahvasti sen aallonpituudesta (λ). Sähkömagneettinen säteily koostuu toisiaan ja säteilyn etenemissuuntaa vasten kohtisuorista sähkö- (E) ja magneettikentistä (B). Tätä on havainnollistettu Kuvassa 1. Sähkömagneettinen säteily on siis aaltoliikettä. Säteilyn aallonpituuden ja taajuuden ν välillä on yhteys.

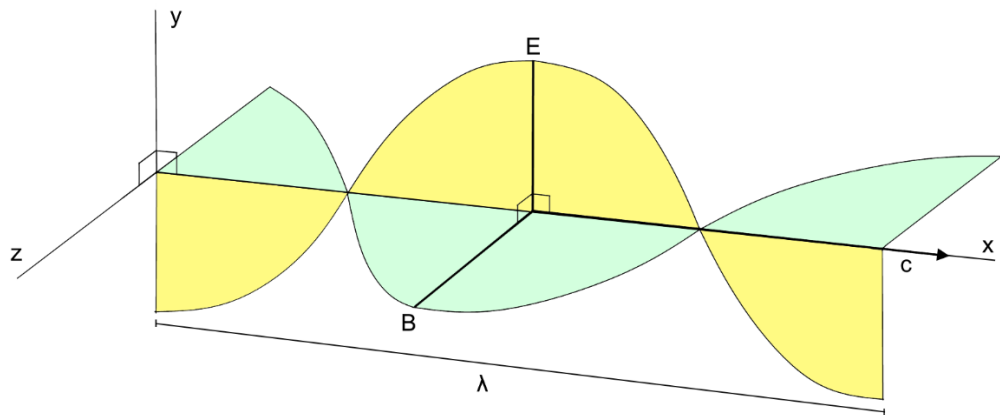
$$\lambda = \frac{c}{\nu}, \quad (1)$$

missä c on säteilyn etenemisnopeus tyhjiössä (299 792 458 m/s). Säteilyn etenemisnopeus riippuu ainoastaan väliaineesta ja esimerkiksi etenemisnopeus ilmassa on hyvin lähellä nopeutta tyhjiössä. Lisäksi spektroskopiassa yleisessä käytössä on aaltoluku $\tilde{\nu}$, joka määritellään aallonpituuden käänteisluvuksi

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda}. \quad (2)$$

Aaltoluvun yksikkönä on tyypillisesti cm^{-1} . Taajuuden ja aaltoluvun käyttämisessä on se etu, että toisin kuin aallonpituus, ne molemmat ovat suoraan verrannollisia säteilyn energiaan. Aallonpituus puolestaan on suureena ehkä helpommin ymmärrettävissä. [1, 3]

Kaikki sähkömagneettinen säteily on periaatteessa samanlaista ja se noudattaa samoja fysiikan lakeja aallonpituudesta riippumatta. Säteilyn vuorovaikutus materian kanssa riippuu kuitenkin vahvasti sen aallonpituudesta. Sähkömagneettisella säteilyllä, tai valolla, on myös hiukkassäteilyn ominaisuuksia. Valon dualistista luonnetta kutsutaan aalto-hiukkasdualismiksi. Valon



Kuva 1. Sähkömagneettinen säteily koostuu sähkö- ja magneettikomponenteista. Aallonpituus λ on säteilyn keskeinen suure. Muokattu lähteestä [3]

hiukkasluonteen avulla kyetään selittämään useita valon ominaisuuksia, joita valon aaltoluonne ei kykene selittämään. Esimerkkejä tästä ovat mustan kappaleen säteily ja valosähköinen ilmiö. Keskeisin hiukkasluonteelle ominainen piirre on valon energian kvantittuneisuus. Se tarkoittaa, että elektromagneettinen säteily muodostuu ja tuhoutuu diskreetteinä kvantteina eikä jatkuvana jakaumana [3]. Näitä valon energian kvantteja kutsutaan fotoneiksi, jotka ovat varauksettomia ja massattomia hiukkasia. Fotonin konseptin kehitti Einstein vuonna 1905 tutkittuaan valosähköistä ilmiötä. Fotonin energia voidaan laskea kaavalla:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (3)$$

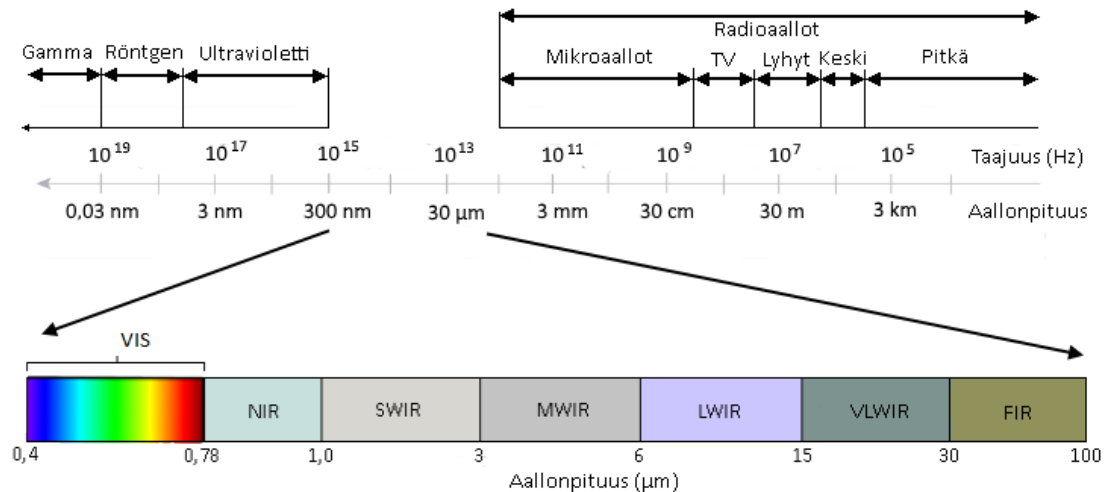
missä h on Planckin vakio ($6,626 \times 10^{-34}$ Js). Kaavasta nähdään, että säteilyn energia on suoraan verrannollinen taajuuteen ja kääntäen verrannollinen aallonpituuteen. [3, 4]

Näkyvä valo kattaa vain pienen osan sähkömagneettisesta säteilystä. Sähkömagneettinen spektri jaetaan eri aallonpituusalueisiin riippuen sen ominaisuuksista. Aallonpituusalueet lyhimmästä aallonpituudesta pisimpään ovat gammasäteily, röntgensäteily, ultravioletti (UV), näkyvä valo (VIS), infrapuna (IR), mikroaallot ja radioaallot. [2] Eri aallonpituusalueet on esitetty tarkemmin Kuvassa 2. Tapoja jakaa spektri eri aallonpituusalueisiin on useita ja tarkat rajat eri alueiden välillä vaihtelevat jonkin verran lähteestä riippuen. Esimerkiksi näkyvän valon kaistaa ei voida tarkasti määrittää, sillä sen rajat vaihtelevat hieman yksilöllisesti [5]. Säteily koostuu tyypillisesti useasta eri aallonpituudesta. Säteilyä, jossa on vain yhden aallonpituuden omaavaa säteilyä, kutsutaan monokromaattiseksi säteilyksi.

Infrapunasäteily voidaan jakaa useaan eri kaistaan. Nämä kaistat on nimetty Taulukossa 1. Tämän kaistajaon lisäksi on myös muita yleisesti käytettyjä tapoja jakaa infrapuna-alue lyhempiin kaistoihin ja koko spektrin tapaan tarkat raja-aallonpituudet eri kaistojen välillä vaihtelevat hieman lähteestä riippuen. Alla esitetty tapa jakaa infrapunasäteily kaistoihin perustuu eri tyyppisten ilmaisimien herkkyyksien rajoihin. [2] Tässä työssä käytetään Taulukossa 1 esitettyä kaistajakoa.

Taulukko 1. *Infrapunakaistat ja niiden jakautuminen eri aallonpituuksille.* [2, s. 3]

Infrapunakaista (eng., lyhenne)	Aallonpituusalue (µm)
Lähi-infrapuna (<i>Near infrared</i> , NIR)	0,78 -1
Lyhytaaltoinfrapuna (<i>Short wavelength IR</i> , SWIR)	1-3
Keskiaaltoinfrapuna (<i>Medium wavelength IR</i> , MWIR)	3-6
Pitkäaaltoinfrapuna (<i>Long wavelength IR</i> , LWIR)	6-15
Hyvin pitkäaaltoinen infrapuna (<i>Very long wavelength IR</i> , VLWIR)	15-30
Kaukoinfrapuna (<i>Far infrared</i> , FIR)	30-100



Kuva 2. Sähkömagneettisen spektrin sisältämät aallonpituusalueet. Muokattu lähteestä [2, s. 3].

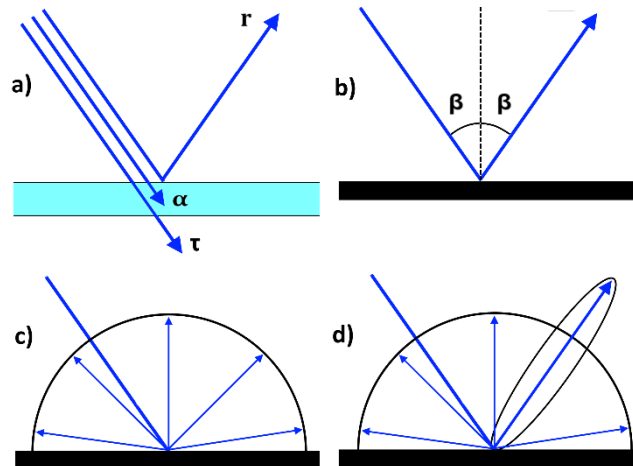
Sähkömagneettinen säteily voi vuorovaikuttaa materian kanssa monella eri tavalla. Materiaa, jossa säteily kulkee, kutsutaan väliaineeksi. Osuessaan pintaan säteilystä osa α absorboituu, osa r heijastuu ja osa τ läpäisee pinnan. Tällaista tilannetta on havainnollistettu Kuvassa 3 a. Näiden mahdollisten vuorovaikutusten summa on 1, joten riippuvuus voidaan kirjoittaa muotoon:

$$\alpha + r + \tau = 1, \quad (4)$$

missä α on materiaalin absorptiosuhde, r heijastussuhde tai heijastavuus ja τ läpäisysuhde tai läpäisevyys. Nämä suureet ovat riippuvaisia aallonpituudesta. [2] Niiden keskinäinen suhde riippuu materiaalista ja pinnan ominaisuuksista. [3] Säteilyä läpäisemättömälle materiaalille riippuvuus voidaan kirjoittaa lyhyempään muotoon:

$$\alpha + r = 1. \quad (5)$$

Säteily voi heijastua pinnasta joko peilimäisesti tai diffuusisti. Peilimäinen heijastus tapahtuu pinnasta, jonka epätasaisuudet ovat pieniä verrattuna säteilyn aallonpituuteen (Kuva 3 b). Peilimäisessä heijastuksessa säteilyn heijastuskulma on pinnan normaalin suhteen sama kuin kulma, jossa säteily saapuu pinnalle (tulokulma). Diffuusiheijastus taas tapahtuu pinnasta, jonka epätasaisuus on suurta aallonpituuteen verrattuna (Kuva 3 c). Diffuusiheijastuksessa säteily leviää pinnalta tasaisesti kaikkiin suuntiin. Hyvä esimerkki diffuusisti heijastavasta pinnasta on heijastinkangas. Mikroskooppisesti tarkasteltuna kaikki heijastukset tapahtuvat samassa kulmassa tulokulmaan nähden, mutta epätasaisessa pinnassa tulokulmat pinnan normaalin suhteen vaihtelevat. Yleensä todellisessa tilanteessa heijastus on peilimäisen ja diffuusisen heijastuksen väli-muoto (Kuva 3 d). [3, s. 99] Koska infrapunasäteilyn aallonpituus on näkyvää valoa suurempi, jotkin varsin diffuusisti näkyvää valoa heijastavat pinnat heijastavat infrapunasäteilyä peilimäisesti. Esimerkkinä heikosti kiillotettu ja hieman oksidoitunut metallipinta.



Kuva 3. a) Säteilyn vuorovaikutuksia pinnan kanssa, b) peilimäinen heijastus, c) diffuusi heijastus ja d) kahden edellisen välimuoto. Mukailtu lähteestä [6, s. 146]

2.2 Radiometria

Radiometria on sähkömagneettisen säteilyn kvantitatiivista mittaamista ultravioletin, näkyvän valon ja infrapunaa aallonpituusalueilla [7]. Siihen sisältyy myös säteilyn ja materiaalin välisen vuorovaikutuksen, kuten taittumisen, heijastumisen, absorptio, läpäisyn sekä siroamisen vaikutuksen mittaaminen. Radiometrian keskeisiä osia ovat mm. terminologia, matemaattiset riippuvuudet, mittayksiköt ja mittalaitteet, jotka kaikki ovat radiometrian työkaluja. [5]

Radiometriassa käytetään varsin useaa fysikaalista suuretta kuvaamaan säteilyä. Keskeisimmät suureet on esitetty Taulukossa 2. Radiometrisiä suureita on esitelty laajemmin esimerkiksi Hudsonin kirjassa *Infrared System Engineering* [8]. Lyhenne sr tarkoittaa steradiaania, joka on avaruuskulman Ω suuruuden mittayksikkö.

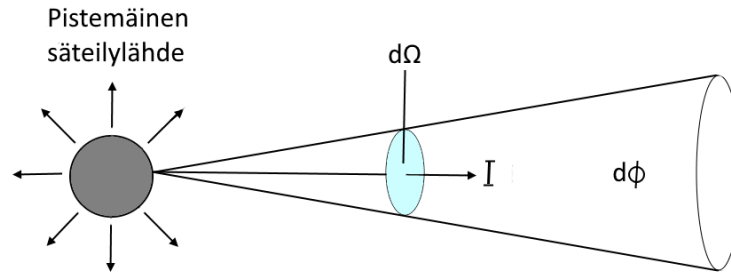
Säteilyvuo ϕ määritellään seuraavalla kaavalla:

$$\phi = \frac{dQ}{dt}, \quad (6)$$

missä Q on säteilylähteen säteilemä energia ja t aika sekunteina. Säteilyvuon yksikkö on W (Js^{-1}). Säteilyvuota kutsutaan myös säteilytehoksi.

Taulukko 2. Radiometriset yksiköt. [2, s.4]

Radiometrinen suure	Symboli	Yksikkö
Säteilyvuo	ϕ	W (Js^{-1})
Kulmaintensiteetti	I	Wsr^{-1}
Irradianssi	E	Wm^{-2}
Radianssi	L	$\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$
Säteilyvoimakkuus	M	Wm^{-2}
Säteilyn energia	Q	J



Kuva 4. Säteilyn kulmaintensiteetti. Mukailtu lähteestä [2, s. 5]

Kulmaintensiteetti I on pistemäisen säteilylähteen tietyllä avaruuskulmalla tiettyyn suuntaan säteilemä säteilyvuoto. Se määritetään seuraavalla kaavalla:

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega}, \quad (7)$$

missä $d\phi$ on säteilyvuoto, joka etenee avaruuskulmassa $d\Omega$. Tätä on havainnollistettu Kuvassa 4. Kulmaintensiteetin yksikkö on Wsr^{-1} .

Irradianssi E on säteilyvuon tiheys pinnalla. Se määritetään seuraavalla kaavalla:

$$E = \frac{\partial\phi}{\partial A}, \quad (8)$$

missä $\partial\phi$ säteilyvuoto, joka saapuu pinnalle ∂A . Irradianssin yksikkö on Wm^{-2} .

Radianssi L on differentiaalista säteilyvuota, joka lähtee pinta-alkiosta tiettyssä kulmassa tiettyyn suuntaan. Se määritetään seuraavalla kaavalla:

$$L = \frac{\partial^2\phi}{\partial\Omega\partial A \cos\theta}, \quad (9)$$

missä $\partial\phi$ on pinta-alkion emittoima säteilyvuoto, joka etenee avaruuskulmassa $\partial\Omega$ määrättyyn suuntaan. ∂A on pinta-alkion pinta-ala ja θ on pinta-alkion normaalin ja säteilyn etenemissuunnan välinen kulma. Radianssin yksikkö on $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$. Irradianssi siis heikkenee voimakkaasti etäisyyden kasvaessa, mutta radianssi pysyy vakiona, jos väliaineen vaikutusta ei huomioida. [2]

Säteilyvoimakkuus M kuvaa pinta-alkiosta koko avaruuskulmaan säteilyn säteilyvuon tiheyden. Se määritetään seuraavalla kaavalla:

$$M = \frac{\partial\phi}{\partial A}, \quad (10)$$

missä $d\phi$ säteilyvuoto, joka emittoituu pinnalta ∂A . Säteilyvoimakkuuden yksikkö on Wm^{-2} . Säteilyvoimakkuudella ja irradianssilla on samat yksiköt, mutta ne määritellään eri tavoilla. Säteilyvoimakkuus on pinnalta lähtevän säteilyn teho pinta-alaa kohden ja irradianssi puolestaan pinnalle saapuva säteilyn teho pinta-alaa kohden. Näin ollen säteilyvoimakkuus soveltuu säteilylähteen emittoiman säteilynmäärän kuvaamiseen ja irradianssi puolestaan vastaanottimen vastaanottaman säteilynmäärän kuvaamiseen. [2] Irradianssia kutsutaan suomen kielessä myös säteilytysvoimakkuudeksi.

2.3 Mustan kappaleen säteily

Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on yli absoluuttisen nollapisteen (0 K / -273,15 °C) emittoivat sähkömagneettista säteilyä. Tätä säteilyä kutsutaan mustan kappaleen säteilyksi. Sen emittoiminen johtuu atomien varauksellisten rakenneosien, elektronien ja protonien, värähtelystä, sillä varaukselliset partikkelit emittoivat säteilyä, kun ne ovat kiihtyvässä liikkeessä. Atomit värähtelevät, mikäli niiden lämpötila on yli absoluuttisen nollapisteen. Mitä korkeampi kappaleen lämpötila on, sitä nopeammin sen atomit värähtelevät ja mitä nopeammin ne värähtelevät, sitä enemmän ne emittoivat säteilyä. Kappaleiden emittoiman säteilyn teho ja sen aallonpituusjakauma riippuvat kappaleen lämpötilasta sekä sen pinnan emissiivisyydestä ϵ . [2, 5]

Mustiksi kappaleiksi kutsutaan kappaleita, jotka absorboivat kaiken niihin osuvan säteilyn ja joiden emissiivisyys on yksi. Ne säteilevät niin paljon kuin kyseisen lämpöinen kappale teoreettisesti kykenee. Mustan kappaleen emittoiman säteilyn määrää tietyllä aallonpituudella voidaan kuvata Planckin lain avulla.

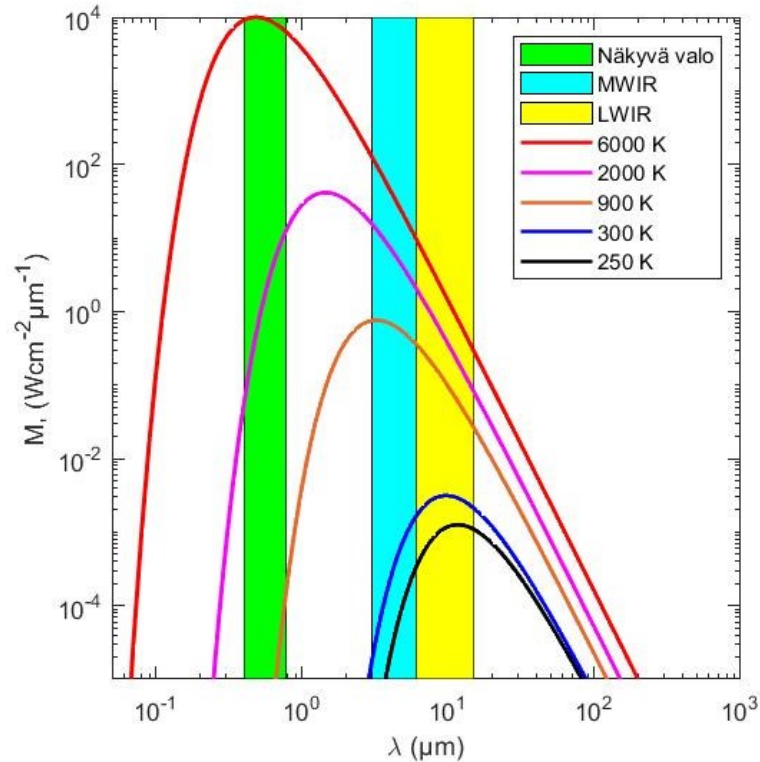
$$L(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (11)$$

$$M(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (12)$$

missä λ on aallonpituus, T on mustan kappaleen pinnan lämpötila Kelvineinä, h on Planckin vakio ($6,626 \cdot 10^{-34}$ Js), c on valonnopeus (299792458 m/s) ja k on Boltzmannin vakio ($1,381 \cdot 10^{-23}$ JK⁻¹). Kun mustan kappaleen lämpötila kasvaa, sen jokaisella aallonpituudella emittoiman säteilyn määrä kasvaa ja aallonpituus, jolla emittoitua säteilyä on suurimmillaan, lyhenee. Emittoitua säteilyä tehon huippukohdan aallonpituus λ_m saadaan Wienin siirtymälain avulla [2]

$$\lambda_m = \frac{2898}{T} \mu\text{m}. \quad (13)$$

Kuvassa 5 on esitetty Planckin lain mukaan laskettujen eri lämpöisten mustan kappaleen säteilijöiden emittoima radianssi aallonpituuden mukaan. Lisäksi kuvaan on merkitty näkyvän valon kaista sekä MWIR- ja LWIR-kaistat. Kuvasta käy selkeästi ilmi, kuinka säteilyn tehon maksimikohta liikkuu lyhemmille aallonpituuksille mustan kappaleen säteilijän lämpötilan kasvaessa. 6000 K lämpöinen säteilijä vastaa likimain aurinkoa. Kuvasta nähdään, että sen säteilytehon huippu on näkyvän valon alueella. 2000 K lämpöinen säteilijä taas vastaa suihkumootoria. Sen maksimikohta taas löytyy näkyvän valon ja MWIR kaistojen väliltä. 900 K lämpöinen säteilijä emittoi vielä hyvin merkittävästi näkyvän valon kaistalla. Tämän voi huomata mm. terästä taottaessa. Asiantunteva henkilö kykeneekin kohtuullisella tarkkuudella arvioimaan metallin lämpötilaa sen hehkun värin ja voimakkuuden perusteella. 300 K / 27 °C:n lämpöinen säteilijä taas vastaa likimain ihmisen lämpöistä kohdetta tai kuumaa kesäpäivää ja 250 K / -23 °C:n lämpöinen säteilijä esimerkiksi metsää talvipakkasella. Kylmimmät kaksi säteilijää emittoivat liki yksinomaan vain infrapuna-alueen säteilyä. Tämä tarkoittaa, ettei ihmissilmä kykene havaitsemaan niitä niiden emit-



Kuva 5. Logaritmisella asteikolla esitettyjä eri lämpöisten mustan kappaleen säteilijöiden emittoimia säteilyvoimakkuuksia aallonpituuden funktiona. Muokattu lähteestä [2, s. 11].

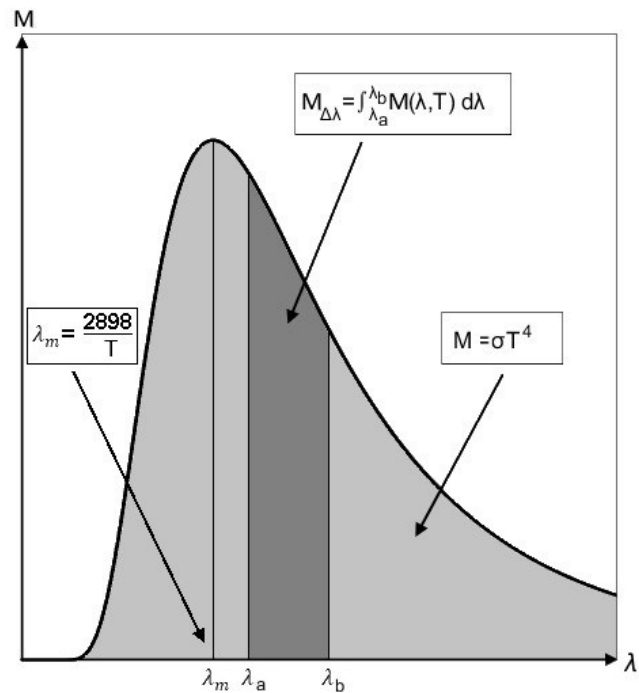
toiman säteilyn perusteella. Sekä 300 K että 250 K lämpöisen säteilijän emission tehon maksimiarvo on LWIR-kaistalla. Se käytännössä merkitsee sitä, että ne on helpompi havaita LWIR-kaistalla toimivalla sensorilla kuin MWIR-kaistan sensorilla.

Emittoidun säteilyn kokonaisteho saadaan integroimalla Planckin laki kaikkien aallonpituuksien yli. Integroimalla saatua riippuvuutta kutsutaan Stefan-Boltzmannin laiksi:

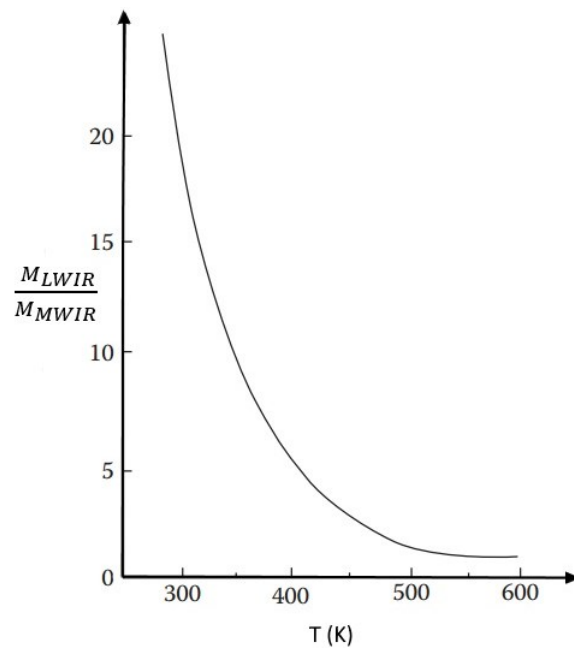
$$M(T) = \int_0^{\infty} M(\lambda, T) d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{2\pi^5 k^2}{15c^2 h^3} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]^{-1} d\lambda = \frac{2\pi^5 k^2}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4, \quad (14)$$

missä σ kutsutaan Stefan-Boltzmannin vakioksi, jonka arvo on noin $5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$. Mustan kappaleen emittoiman säteilyn teho riippuu siis lämpötilan neljännestä potenssista. Tämä tarkoittaa, että lämpötilan kasvaessa säteily kokonaisteho kasvaa hyvin voimakkaasti. [3] Esimerkiksi auringon absoluuttinen lämpötila on ihmistä noin 20 kertaa korkeampi, mutta se säteilee noin 100 000-kertaisesti suuremmalla teholla pinta-alaa kohden [9, s. 7].

Integroimalla Planckin laki tietyn aallonpituusalueen yli saadaan määritettyä mustan kappaleen emittoiman säteilyn määrä kyseisellä aallonpituusalueella. Kuvassa 6 on esitetty Planckin lain mukaan laskettu mustan kappaleen emissiospektri. Käyrän alle jäävä pinta-ala vastaa Stefan-Boltzmannin lain mukaisesti säteilyä kokonaistehoa. Tahdottaessa selvittää tietyn lämpöisen mustan kappaleen säteilemä teho tietyllä aallonpituusvälillä $\Delta\lambda = [\lambda_a, \lambda_b]$, tulee Planckin laki integroida kyseisen välin yli, kuten Kuvassa 6 on demonstroitu. Säteilyn tehon huippukohta λ_m taas kyetään määrittämään Wienin siirtymälain avulla.



Kuva 6. Mustan kappaleen säteilijän emissiospektri. Muokattu lähteestä [2, s. 12].



Kuva 7. Mustan kappaleen LWIR- ja MWIR-kaistoilla emittoiman säteilyn tehon suhde säteilijän lämpötilan funktiona. Muokattu lähteestä [2, s. 12].

Kuvassa 7 on esitetty mustan kappaleen säteilijän LWIR- ja MWIR-kaistoilla emittoiman säteilyvoimakkuuden suhde lämpötilan funktiona. Kuvasta nähdään, että suhde riippuu hyvin voimakkaasti säteilijän lämpötilasta. Alle 500 K lämpöiset kappaleet emittoivat LWIR-kaistalla voimakkaammin kuin MWIR-kaistalla. Huoneenlämpöisillä kappaleilla suhde on LWIR-kaistan hyväksi jo noin 20-kertainen.

Reaaliset kappaleet eivät ole mustan kappaleen säteilijöitä, vaan niiden emissiivisyys ε on alle yksi ja se vaihtelee riippuen aallonpituudesta. Kappaleita, joiden emissiivisyys on vakio koko spektrin alueella, kutsutaan harmaiksi kappaleiksi. [5] Emissiivisyys määritellään kappaleen säteilemän lämpötehon suhteena mustan kappaleen säteilemään tehoon Kirchhoffin lain mukaisesti: [2, 10]

$$\varepsilon = \frac{M(\lambda, T)_{kappale}}{M(\lambda, T)_{bb}}, \quad (15)$$

missä ε on emissiivisyys, $M(\lambda, T)_{kappale}$ on todellisen kappaleen emittoima säteilyvoimakkuus ja $M(\lambda, T)_{bb}$ on mustan kappaleen emittoima säteilyvoimakkuus.

Koska pinnan on oltava energeettisesti tasapainossa, sen säteilyn absorptio ja emission tulee olla yhtä suuret, eli

$$\alpha = \varepsilon, \quad (16)$$

mikä pätee jokaisella aallonpituudella [3]. Koska $\alpha + r = 1$, voidaan ylempi riippuvuus kirjoittaa myös muotoon:

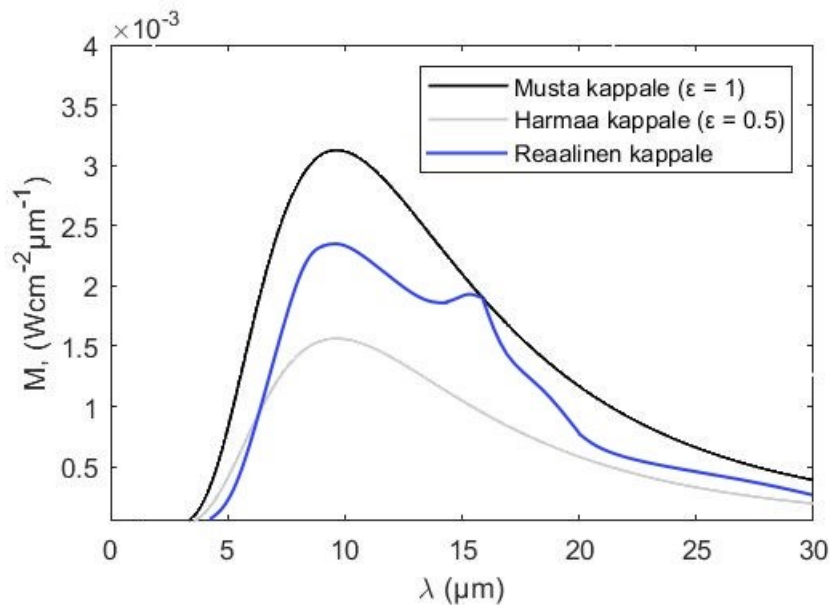
$$\varepsilon = 1 - r, \quad (17)$$

tai

$$\varepsilon + r = 1. \quad (18)$$

Tämä tarkoittaa, että läpinäkymättömästä kappaleesta peräisin oleva säteily on sen heijastamaa tai emittoimaa säteilyä. [2; 10, s. 378]

Kuvassa 8 on havainnollistettu emissiivisyyden vaikutusta kappaleen emittoiman säteilyn määrään. Taulukossa 3 on esitetty joidenkin materiaalien emissiivisyyksiä. Tyypillisesti muiden materiaalien kuin kiiltävien metallien infrapuna-alueen emissiivisyys on varsin lähellä yhtä, mutta joidenkin materiaalien, kuten kvartsin emissiivisyys vaihtelee merkittävästi aallonpituudesta riippuen [10, s. 373].



Kuva 8. Kolmen eri emissiivisyyden omaavan 300 K lämpöisen kappaleen emittoimat säteilyvoimakkuudet. Mukailtu lähteestä [2, s. 13].

Taulukko 3. Joidenkin materiaalien emissiivisyyksiä. [11, 12]

Materiaali	Emissiivisyys (ϵ)
ihmisen iho	0,98
lasi	0,94
kuiva maa	0,92
metsä	0,90
rauta, hapettunut, LWIR-kaista	0,85
rauta, hapettunut, MWIR-kaista	0,64
alumiini, kiillottamaton	0,09
alumiini, kiillotettu	0,05
kulta, kiillotettu	0,02

2.4 Ilmakehän vaikutus säteilyn etenemiseen

Väliaine, jossa sähkömagneettinen säteily etenee, vuorovaikuttaa säteilyn kanssa. Maan päällä väliaine on tyypillisimmin ilmaa. Mikäli säteily on peräisin ympäristöstään lämpimämmästä kappaleesta, huomattavin vaikutus säteilyn etenemiselle on sen vaimeneminen. Vaimeneminen johtuu absorptiosta ja siroamisesta. Lisäksi myös ilma, kuten kaikki muukin materia, emittoi säteilyä. Absorboitua ja emittoitua säteilyä määrää ja aallonpituusjakauma riippuvat ilman seossuhteesta ja etenkin lämpötilasta.

Ilma koostuu useasta eri ainesosasta, joilla on vaihtelevat vaikutukset säteilyn kulkuun. Ilmakehän koostumus tilavuuksien suhteena on esitetty Taulukossa 4. Pitoisuus tilavuuden suhteen on sama kuin pitoisuus molekyylin määrän tai osapaineiden suhteen. Ylivoimaisesti suurin osa, noin 99 %, kuivasta ilmasta koostuu tyypeistä ja hapesta, jotka ovat kaksiatomisia molekyyleja.

Taulukko 4. Ilmakehän merkittävimmät ainesosat ja niiden pitoisuudet. Ainesosat, jotka merkittävästi absorboivat säteilyä aallonpituusvälillä 2 – 15 μm on lihavoitu. [13]

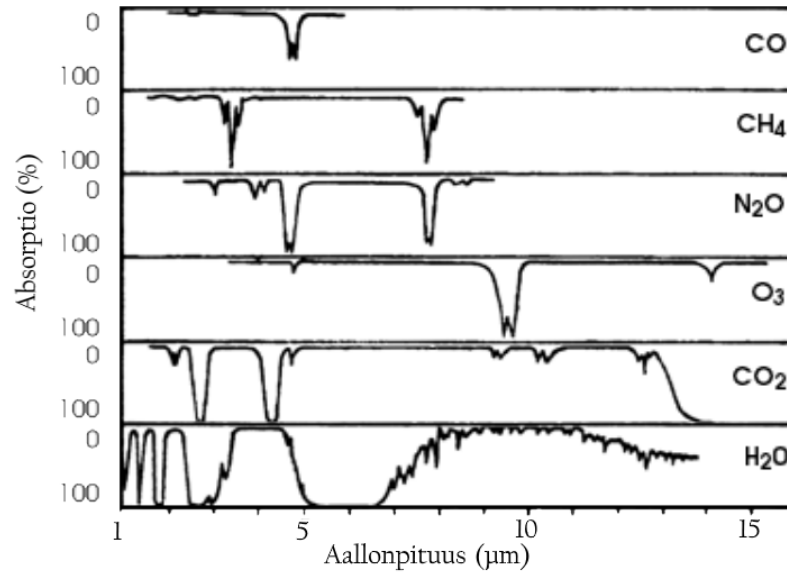
Ainesosa	Tilavuusosuus
typpi (N_2)	78,08 %
happi (O_2)	20,95 %
argon (Ar)	0,93 %
vesihöyry (H_2O)	0 – 5 %
hiilidioksidi (CO_2)	380 ppm
neon (Ne)	18 ppm
helium (He)	5 ppm
metaani (CH_4)	1,75 ppm
krypton (Kr)	1 ppm
vety (H)	0,5 ppm
typpioksidi (N_2O)	0,3 ppm
otsoni (O_3)	0 – 0,1 ppm

Vesihöyryn osuus on lisäksi hyvin merkittävä, mutta sen pitoisuus vaihtelee varsin paljon riippuen mm. ilmastosta ja säästä. Myös otsonin pitoisuus vaihtelee merkittävästi riippuen sekä maantieteellisestä paikasta että etenkin etäisyydestä maan pinnasta. [13, 14] Hiilidioksidin pitoisuus ilmakehässä on varsin vakio. Se voi kuitenkin vaihdella huomattavasti sijainnin mukaan, mikä johtuu etenkin ihmisen toiminnasta. [13] Lisäksi sisäilmassa hiilidioksidin pitoisuus saattaa nousta varsin korkeaksi lähinnä ihmisten hengityksen takia, mikä saattaa aiheuttaa radiometrisissä mittauksissa tietyillä aallonpituuskaistoilla merkittävää mittausepä tarkkuutta.

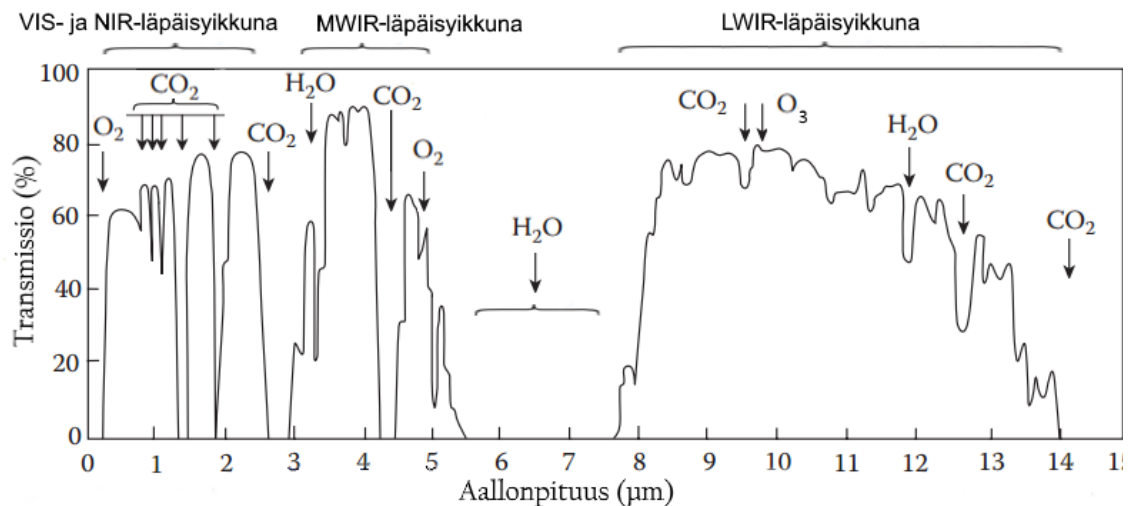
Vaikka ilmakehä kostuu ylivoimaisesti suurimmaksi osaksi typestä, hapestä ja argonista, ilmakehän kaasuista eniten infrapunasäteilyn absorboitumiseen vaikuttavat vesihöyry, hiilidioksidi ja otsoni. Lisäksi pieni vaikutus on hiilimonoksidilla, typpioksidilla ja metaanilla. Viimeksi mainittuja kaasuja on kuitenkin ilmakehässä niin pieniä pitoisuuksia, että niiden vaikutus on varsin pieni. [14] Ilmakehän ylivoimaisesti yleisimmät kaasut typpi, happi ja argon eivät merkittävästi vaikuta säteilyn vaimenemiseen toisin kuin pienempinä pitoisuuksina esiintyvät aiemmin mainitut kaasut, koska symmetrisillä kaksiatomisilla typpi- ja happimolekyyleillä sekä argon atomeilla ei ole elektronista dipolia toisin kuin muilla mainituilla molekyyleillä [8, s. 117]. Molekyylit, joilla on sähköinen dipoli, vuorovaikuttavat etenkin verrattain pitkäaaltoisen sähkömagneettisen säteilyn kanssa vahvemmin kuin dipolittomat molekyylit. [13] Jos ilmakehä koostuisi pääasiassa dipolisista molekyyleistä, infrapunasäteilyn vaimeneminen olisi paljon voimakkaampaa.

Ilmakehä absorboi liki kaiken auringon säteilyn, jonka aallonpituus on alle 310 nm, koska sillä on riittävästi energiaa hajottamaan ilmassa olevien molekyyliden, kuten otsonin, atomien välisiä sidoksia (fotodissosiaatio) ja irrottamaan elektroneja atomeista (fotoionisaatio). Aallonpituusalueella 240 – 310 nm, joka kuuluu ultraviolettialueeseen, otsonin absorptio on niin voimakasta, että ultraviolettisäteily ei kykene läpäisemään noin 20 – 30 km korkeudessa sijaitsevaa otsonikerrosta. Infrapunaa aallonpituuksilla säteilyllä ei ole riittävästi energiaa hajottamaan vahvoja atomien välisiä sidoksia tai virittämään elektroneja korkeammille energiatiloille, joten absorptiomekanismit näillä aallonpituusalueilla liittyvät lähinnä molekyyliden rotaatiolajien ja vibraatiolajien tilojen muutoksiin, jotka ovat mahdollisia lähinnä dipolisille molekyyleille, kuten vedelle tai hiilidioksidille. Syy siihen, että tietyt kemialliset yhdisteet absorboivat säteilyä vain tietyillä aallonpituuksilla on se, että kvanttimekaniikan mukaisesti molekyyleillä voi olla vain tietyt kvantittuneita energiatiloja. Vain tietyt elektronien energiatilat, tietyt molekyyliden pyörimisnopeudet sekä värähtelyn taajuuudet ja amplitudit ovat sallittuja. Tämän takia molekyyliden energiatilat voivat säteilyn vaikutuksesta muuttua korkeammiksi vain, jos ne absorboivat fotonin, jolla on sopiva energia (tai aallonpituus) korkeammalle energiatilalle siirtymiseksi. Sama pätee vastavuoroisesti energiatilan pienentymiseen (purkautumiseen). Se onnistuu emittoimalla fotonin, jolla on tietty energia. [13, 15] Ilmakehän absorption kannalta keskeisimpien kaasujen absorptiospektrit on esitetty Kuvassa 9 ja ilmakehän transmissiospektri noin 1,8 km matkalla merenpinnan tasolla Kuvassa 10.

Ilmakehän kaasujen absorption takia infrapuna-alueella kytetään hyödyntämään vain tietyt aallonpituuskaistoja, joilla säteily läpäisee ilmakehän riittävän hyvin kantaakseen riittävän pitkälle. Näitä kaistoja kutsutaan läpäisyikkunoiksi. Niiden ulkopuolella infrapunasäteily etenee liian



Kuva 10. Ilmakehässä esiintyvien kaasujen absorptiospektrit aallonpituusalueella 1 – 15 μm . Mukailtu lähteestä [16].



Kuva 9. Ilmakehän transmissio VIS-, NIR-, SWIR-, MWIR- ja LWIR-kaistoilla merenpinnalla noin 1,8 km matkalla. Kuvaan on merkitty keskeisimmät säteilyä absorboivat kaasut niiden kaistojen kohdalle, jota ne absorboivat. Mukailtu lähteistä [2; 8, s. 115].

heikosti useimpien sovellusten kannalta. Näkyvän valon ja lähi-infrapuna-kaistan läpäisyikkuna sijoittuu noin aallonpituuskaistalle 0,3 – 2,5 μm , MWIR-kaistan läpäisyikkuna noin aallonpituuskaistalle 3 – 5 μm ja LWIR-kaistan läpäisyikkuna noin kaistalle 8 – 14 μm . MWIR-kaistalla erityisen merkittävä tekijä on hiilidioksidin absorptiopiikki noin aallonpituudella 4,2 μm . [2, 8]

Säteilyn siroaminen johtuu ilmassa olevista partikkeleista ja se aiheuttaa säteilyn etenemissuunnan muutoksen, sillä siroamisessa säteily ensin absorboituu partikkeliin, minkä jälkeen par-

tikkeli emittoi säteilyn samalla aallonpituudella. Siroaminen riippuu vahvasti partikkelien koon suhteesta säteilyn aallonpituuteen. Jos partikkelin koko suhteessa säteilyn aallonpituuteen on pieni (läpimitta alle $0,1\lambda$), siroamisprosessi tunnetaan Rayleigh-sirontana, joka on kääntäen verrannollinen aallonpituuden neljänteen potenssiin. Rayleigh-sironta leviää tasaisesti partikkelin etu- ja takapuolille säteilyn etenemissuuntaan nähden. Jos partikkelin koko on säteilyn aallonpituuden kanssa samaa luokkaa, sirontaa kutsutaan Mie-sironnaksi, jonka vaikutus ei merkittävästi riipu säteilyn aallonpituudesta, vaan sirottavien partikkelien määrästä, ja joka suuntautuu lähinnä säteilyn alkuperäiseen etenemissuuntaan. [13] Kokoriippuvuuden takia ilman molekyylit eivät käytännössä aiheuta sirontaa säteilylle, jonka aallonpituus on yli $2\text{ }\mu\text{m}$. Tämä tarkoittaa, että SWIR-kaistan säteily tai sitä pidempi aallonpituuksinen säteily ei siis käytännössä siroa ilman molekyyleistä. Kokonsa takia myöskään savuhiukkaset eivät aiheuta sirontaa infrapunasäteilylle. Tästä syystä infrapunakameroilla näkee varsin hyvin savun läpi, vaikka savu voi olla ihmissilmälle läpinäkymätöntä. Kuitenkin, erilaiset aerosolit, sumu, pilvet ja sade, joiden partikkelikoot ovat infrapunäsäteilyn aallonpituuteen verrattuna suuria, vaimentavat sitä hyvin tehokkaasti. Etenkin sade ja pilvet heikentävät infrapunakameroiden käyttömahdollisuuksia hyvin merkittävästi. Syitä tähän ovat sekä sironta, että absorptio. [2, 12]

Korkeus merenpinnan tasosta on ilmakehän vaimennuksen kannalta merkittävä tekijä, sillä ilmakehän tiheys pienenee korkeuden kasvaessa, mikä vaikuttaa absorptiota ja siroamista aiheuttavien molekyyliden ja suurempien partikkelien määrään. Erityisen vahva vaikutus sillä on vesihöyryn määrään. Lisäksi huomion arvoista on, että ilmakehän alimmassa kerroksessa tropospaussissa lämpötila laskee korkeuden kasvaessa välillä $0 - 10\text{ km}$, mikä vaikuttaa ilman ainesosien absorptioon ja emission voimakkuuteen. [8] Ilmakehän paineen ja lämpötilan riippuvuudet sekä muita säteilyn etenemiseen vaikuttavia ilmakehän ominaisuuksia on tarkemmin esitetty Wallacen ja Hobbsin teoksessa *Atmospheric Science* [13, s. 9 – 10].

3. KUVANTAVA RADIOMETRIA INFRAPUNA-ALUEELLA

Tässä luvussa käsitellään infrapuna-alueen kuvantavien radiometrien toimintaperiaatetta ja rakennetta keskittyen erityisesti tähän työhön liittyviin sensoreihin. Lisäksi käsitellään absoluuttisiin infrapuna-alueen mittauksiin liittyviä haasteita.

Radiometriset termisen infrapuna-alueen kuvantavat sensorit, tai infrapunakamerat, mittaavat säteilyä ja sen voimakkuutta. Ne eivät siis mittaa lämpötilaa, vaikkakin niiden keräämästä signaalista saatetaan, tilanteesta riippuen, kyetä määrittämään kuvattavan kohteen pintalämpötila varsin tarkasti, sillä kappaleiden emittoiman säteilyn määrä on verrannollinen niiden lämpötilaan Planckin lain mukaisesti. Lämpötilan mittaamista säteilyn avulla kutsutaan pyrometriaksi [1]. Tämän työn viitekehyksessä siis kuvantava radiometrinen infrapunasensori tai infrapunakamera on lämpökameraa parempi termi kuvaamaan käytettyä mittauslaitteistoa.

Termisen infrapuna-alueen kamerat ovat pääsääntöisesti MWIR- (n. 3 – 6 μm) tai LWIR-kaistoilla (n. 8 – 14 μm) toimivia passiivisia kuvantavia sensoreita. Niiden herkkyysalueiden rajaus näille kaistoille johtuu useasta tekijästä: materiaalien kyvystä vuorovaikuttaa sähkömagneettisen säteilyn kanssa, mikä asettaa rajoituksia ilmaisimen valmistukseen; ilmakehän transmissioikkunoista, joiden ulkopuolella säteily etenee heikosti; sekä siitä, että havainnoitavat kohteet tyypillisesti emittoivat säteilyä tehokkaimmin juuri kyseisillä kaistoilla. Passiivisella viitataan siihen, että sensorin itse ei emittoi säteilyä, jonka heijastuksia kohteista se havainnoisi, vaan se havaitsee ainoastaan muista säteilylähteistä peräisin olevaa säteilyä [17]. Kuvantavalla sensorilla tarkoitetaan sensoria, joka matriisi-ilmaisimensa ja optiikkansa avulla muodostaa havaitsemastaan kohteesta ja taustasta kuvan. [12]

Termisen infrapuna-alueen kamerat kuvaavat kohteista ja taustasta peräisin olevaa infrapunasäteilyä, joka on yleensä pääasiassa kohteiden ja taustan itsensä emittoimaa ja jonka voimakkuus riippuu vahvasti niiden pintalämpötilasta. Infrapunakameralla otetut kuvat ovat yleensä harmaasävyisiä. Näkyvän valon aallonpituusalueella toimivat kamerat taas kuvaavat kohteista ja taustasta liki yksinomaan heijastunutta säteilyä. Kohteen väri määräytyy sen mukaan, kuinka paljon minkäkin väristä näkyvän valon aallonpituutta se heijastaa. Esimerkiksi kasvien vihreät lehdet heijastavat eniten vihreää valoa. Eroa infrapunakameralla ja näkyvän valon kameralla otetuissa kuvissa havainnollistetaan Kuvassa 11. Ylempi kuva on otettu MWIR-kaistan infrapunakameralla ja alempi näkyvän valon värikameralla. Kuvat on otettu liki samana ajankohtana samasta paikasta tammikuussa auringon juuri laskiessa. Infrapunakameralla otetussa kuvassa on havaittavissa puiden runkojen olevan vielä oksiaan lämpimämpiä, mikä johtuu siitä, että aurinko on aiemmin lämmittänyt niitä ja ne ovat suuremman massansa takia jäähtyneet hitaammin kuin oksat. Lisäksi voidaan havaita oikeanpuoleisen lohkolämmityksessä olevan auton nokan olevan lämpimämpi kuin vasemmanpuoleisen auton nokan. Liikennemerkissä olevaan P-kirjainta taas ei näy, sillä merkki on tasalämpöinen, eikä kirjaimen ja sen taustan emissiivisyyksissä ole merkittävää eroa.



Kuva 11. Ylempi kuva on otettu MWIR-kaistan infrapunakameralla ja alempi näkyvän valon värikameralla tammikuussa auringon laskeissa.

Termisellä infrapuna-alueella toimivan sensorin yksi erittäin merkittävä etu on sen kyky havaita kohteita täysin pimeässä. Tämä on erityisen tärkeää esimerkiksi sotilassovelluksissa, joissa passiivinen pimeätoimintakyky on kriittisen tärkeää, sillä aktiivinen valaisu voi paljastaa omien joukkojen sijainnin. Esimerkiksi näkyvän valon ja NIR-kaistoilla toimivat valonvahvistimet vaativat aina jonkin verran valoa ja joissain olosuhteissa aktiivista valaistusta. Auringonvalon puuttuminen voi taas jopa parantaa infrapunakameroiden kykyä havaita kohteita, sillä auringonvalon lämmittäessä taustaa kohteen ja taustan välinen kontrasti usein laskee. [12] Toinen termisen infrapunakameran merkittävä etu on sen näkyvän valon ja NIR-kaistojen säteilyyn verrattuna parempi kyky läpäistä savua [2].

Tyypillisesti havainnoitaessa noin ympäristön lämpöisiä kohteita käytetään LWIR-kaistan sensoreita, sillä kohteet, joiden lämpötila on suuruusluokkaa 300 K, säteilevät eniten kyseisellä kaistalla. Paljon ympäristöä lämpimämpiä kohteita (lämpötila suuruusluokkaa 1000 K) havainnoitaessa taas tyypillisesti käytetään MWIR-kaistan sensoreita, sillä kyseisellä kaistalla kontrasti kohteen ja taustan välillä on suurempi. MWIR-kaistan etuja LWIR-kaistaan verrattuna ovat parempi hyvän sään suorituskky, ilmankosteuden pienempi vaikutus ja parempi saavutettavissa oleva resoluutio noin kolminkertaisesti pienemmän diffraktion ansiosta [2, s. 19].

3.1 Infrapunakameroiden suorituskvyn keskeiset parametrit

Infrapunakameroiden suorituskvyn vertailukelpoinen arviointi on haastavaa, sillä sensoreita on laaja kirjo ja niiden toimintaperiaatteet eroavat paljon toisistaan. Niiden suorituskvyn kuvaamiseen on kuitenkin kehitetty useita eri parametreja, joita esitellään tässä luvussa.

Vaste R (eng. *responsivity*) kuvaa ilmaisimen absorboiman säteilyn ja sen antaman signaalin suhdetta. Se on tyypillisesti aallonpituuden λ ja sähköisen taajuuden f funktio ja se määritetään kaavalla:

$$R_v(\lambda, f) = \frac{V_s}{\phi(\lambda) \Delta\lambda}, \quad (19)$$

missä R_v on ilmaisimen jännitteellinen vaste, $\phi(\lambda)$ on ilmaisimelle päätynyt säteilyvuo ja V_s on sen aiheuttaman sähköisen signaalin jännitteen neliöllinen keskiarvo. Vasteen yksikkö on VW^{-1} tai AW^{-1} , jos määrittelyyn käytetään jännitteen sijasta virtaa. [2, s. 33]

Kvanttitehokkuus η määritellään ilmaisimelle päätyvien fotonien määrän suhteena niiden tuottamien sähköisesti havaittavien elektronien määrään. Se voidaan määrittää seuraavalla kaavalla:

$$\eta(\lambda) = \frac{R_v(\lambda)}{\lambda} \frac{hc}{q}, \quad (20)$$

missä q on elektronin varaus $-1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. [5, s. 238 – 239]

NEP on järjestelmän ekvivalentti kohinateho (eng. *Noise Equivalent Power*). Se on parametri, joka kuvaa tehoa, jolla kohteesta tuleva signaali on yhtä suuri kuin ilmaisimen sisäinen pimeävirta. Tällöin signaalin ja kohinan suhde SNR (eng. *signal to noise ratio*) on 1. NEPin yksikkö on watti. [2, s. 34]

Ilmaisevuus D (eng. *detectivity*) on NEPin käänteisluku:

$$D = \frac{1}{NEP}. \quad (21)$$

Ilmaisevuuden ja NEPin avulla ilmaisimen vertailu on kuitenkin ongelmallista, sillä niiden arvot riippuvat tyypillisesti ilmaisinelementin pinta-alasta A_d ja sähköisestä kaistan leveydestä Δf . Tämän takia on määritelty normitettu ilmaisevuus, D^* (eng. *normalized detectivity*), jonka avulla saman tyyppisiä säteilyilmaisimia voidaan verrata keskenään. Se määritetään ilmaisevuudesta D seuraavalla kaavalla, joka voidaan ilmaista useassa muodossa:

$$D^* = D(A_d \Delta f)^{1/2} = \frac{(A_d \Delta f)^{1/2}}{NEP} = \frac{(A_d \Delta f)^{1/2}}{V_n} R_v, \quad (22)$$

missä V_n on kohinan aiheuttaman jännitteen neliöllinen keskiarvo. Normalisoidun ilmaisevuuden yksikkö on $\text{cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, jota kutsutaan parametrin kehittäjän mukaan myös nimityksellä ”Jones” [2, s. 35]. Sitä voidaan pitää keskeisimpänä ilmaisimen suorituskykyä kuvaavana parametrina, sillä se soveltuu eri pinta-alan omaavien ilmaisimien tasavertaiseen vertailuun. [2, s. 34 – 35; 18, s. 74 – 75]

Kohinaekvivalentti lämpötilaero (eng. *Noise Equivalent Temperature Difference*, NETD) on parametri, joka kuvaa sensorin lämpötilaherkkyttä tai termistä resoluutiota. Se on käytännössä pienin mustan kappaleen säteilijöiden lämpötilaero, jolla sensori erottaa ne toisistaan. Mitä pienempi kameran NETD-arvo on, sitä parempi on sen terminen resoluutio. NETD riippuu ilmaisimen lisäksi koko infrapunakameran ominaisuuksista, kuten linssin halkaisijasta ja läpäisevyydestä. NETD-arvo ilmoitetaan tyypillisesti yksikössä mK. [18, s. 74 – 77, 139]

Taulukko 5. Olennaisia infrapunakameroihin liittyviä parametreja ja käsitteitä.

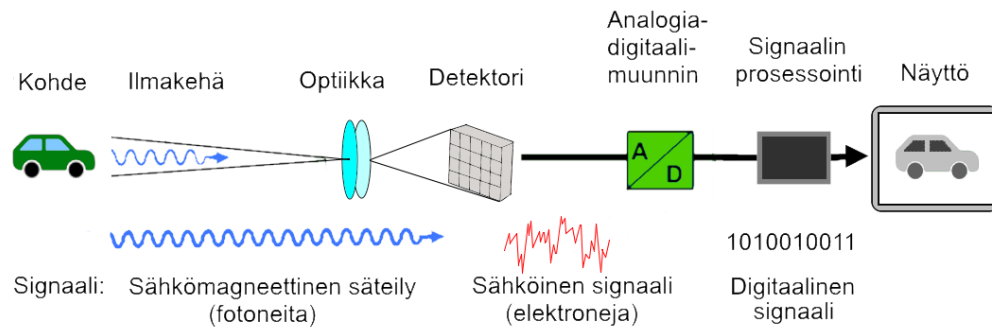
Parametri tai käsite	Selitys
Integrintiaika (IT)	Aika jona sensori kerää signaalia yhtä kuvaa (<i>frame</i>) varten
Kuvaustaajuus	Taajuus, jolla kamera kuvaa. Esim. 100 Hz kuvaustaajuudella kamera ottaa 100 kuvaa per sekunti.
Dynaaminen alue	Suhde pienimmän ja suurimman arvon välillä mitä sensori voi mitata. Esimerkiksi 14 bittinen sensori voi saada arvoja väliltä 0 – 16 383 (2^{14}). Koko dynaaminen alue ei usein kuitenkaan ole hyödynnettävissä.

Koska mustan kappaleen säteilyn voimakkuus kasvaa eksponentiaalisesti suhteessa kappaleen lämpötilaan, NETD:n tapauksessa tulisi ilmoittaa millä kohteen lämpötilalla se on määritetty. Usein sitä ei kuitenkaan ole ilmoitettu. Esimerkiksi FLIR määrittää NETD-arvon kohteen lämpötilalla 25 °C. Mittaus suoritetaan ilman optiikkaa ja sellaisella kameran integrintiajalla, jolla se on noin dynaamisen alueensa puolessa välissä. [19] NETD:n määrittäminen on kuvattu tarkemmin standardissa VDI 5585. Lisäksi Taulukossa 5 on esitetty muutama muu infrapunakameroihin liittyvä parametri ja käsite, joiden merkitys kannattaa tuntea.

3.2 Kuvantavan infrapunasensorin rakenne ja toimintaperiaate

Kuvantavia infrapunasensoreita on hyvin useita eri tyyppisiä ja niiden rakenne vaihtelee. Erilaiset sensorit soveltuvat erilaisiin käyttötarkoituksiin. Ehkä merkittävin rakenteellinen jakoperuste voidaan tehdä jäähdytettujen ja jäähdyttämättömien sensorien välille. Tässä työssä käytettiin jäähdytettyä sensoria, joten sen toimintaan tutustutaan tässä luvussa tarkemmin.

Jäähdytetyssä kuvantavassa infrapunasensorissa on useita komponentteja, joilla kaikilla on jokin funktio. Komponentteja ovat mm. optiikka, suotimet, ilmaisin, ilmaisimen ympäristöstään eristävät kerrokset, jäähdytin, signaalin prosessointiin liittyvät komponentit, joiden tehtävä on muuntaa elektroninen signaali digitaalseksi, sekä jonkinlainen käyttäjäliittymä, esimerkiksi näyttö. [8, s. 14 – 15] Infrapunasensorit havaitsevat sähkömagneettista säteilyä. Signaalin muoto muuttuu prosessin eri vaiheiden jälkeen yleensä lopulta digitaaliseen muotoon. Yksinkertaistettu esimerkki sensorin rakenteesta ja signaalin muodoista eri vaiheissa ulostulosignaalin muodostusta on esitetty Kuvassa 12. Enemmän tietoa infrapunasensorien tekniikasta ja niiden suunnittelusta löytyy mm. Hudsonin teoksesta *Infrared System Engineering* [8].



Kuva 12. Yksinkertaistettu esimerkki kuvantavan infrapunasensorin rakenteesta ja toiminnasta sekä signaalin muodoista eri vaiheissa kuvanmuodostusprosessissa. Periaate lähteestä [8, s. 15].

Optisten linssien tehtävä infrapunasensoreissa on kerätä sensorin näkökentästä säteilyä ja keskittää se ilmaisimelle tiettyyn pisteeseen. Termisen infrapuna-alueen linssit toimivat periaatteellisesti aivan samalla tavalla kuin muissa optisissa laitteissa käytetyt näkyvän valon linssit. Merkittävin ero on linseissä käytettävät materiaalit, sillä infrapunasäteily ei läpäise tavallista näkyvän valon sensoreissa käytettävää lasia. Tyypillisimpiä infrapunasensorin linseissä käytettyjä materiaaleja ovat germanium (Ge) ja pii (Si). Germanium on näkyvän valon alueella läpikuultamaton puolijohdemateriaali. Se on varsin kallis materiaali, joka soveltuu käytettäväksi linseissä sekä MWIR- että erityisesti LWIR-kaistalla. Germaniumista valmistetut linssit vaativat pinnoituksen heijastuksenestopinnoitteilla ja niiden taitekerroin (≈ 4) vaihtelee merkittävästi lämpötilan mukaan, mikä voi aiheuttaa ongelmia joissakin sovelluksissa. Pii on linssinvalmistukseen liittyviltä ominaisuuksiltaan varsin samankaltainen materiaali kuin Germanium. Merkittävimmät erot ovat piin hieman matalampi taitekerroin ($\approx 3,45$), merkittävästi matalampi hinta ja soveltuvuus käytettäväksi ainoastaan MWIR-kaistalla. Linssit eivät ole koskaan täydellisiä, vaan niiden läpäisevyys jää alle 100 %:n. Se myös tarkoittaa, että linssit aina hieman absorboivat ja heijastavat säteilyä. Kuitenkin laadukkaiden linssien läpäisevyys on hyvin lähellä 100 %:a. [2, s. 15 – 16]

Linssien lisäksi useissa infrapunasensoreissa käytetään myös heijastavia peilejä säteilyn kulkureitin ohjaamiseen. Peilit ovat usein pinnoitettu joko alumiinilla, hopealla tai kullalla, joiden kaikkien heijastavuus infrapuna-alueella on korkea, noin 95 %. Erityisen hyvä heijastavuus on kullalla, jonka heijastavuus on jopa noin 99 % aallonpituusalueella 0,8 - 50 μm . [2, s. 15]

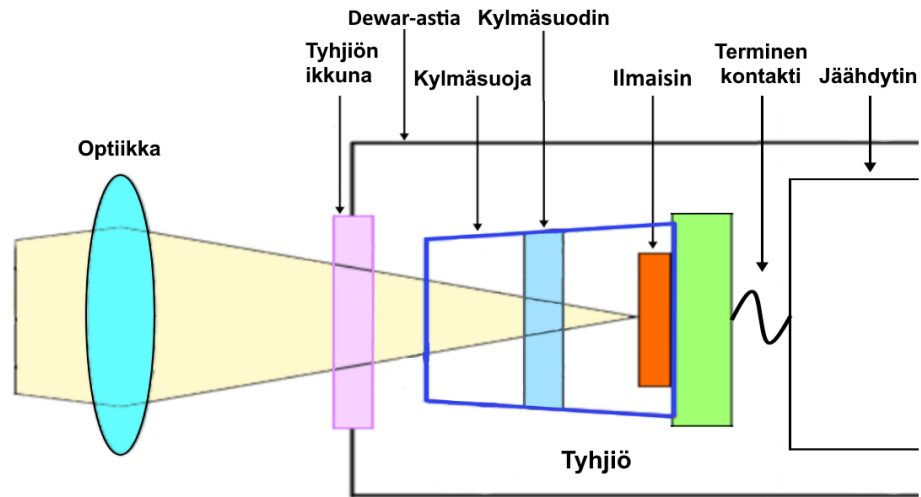
Infrapunasensoreissa käytetään erilaisia suotimia. Niiden tehtävänä on muokata sensorin spektraalista vastetta rajaamalla ilmaisimelle saapuvan säteilyn voimakkuutta ja aallonpituutta. [2] Suotimia on erityyppisiä. Osa suotimista on suunniteltu vaimentamaan säteilyn voimakkuutta esimerkiksi 10 %:in alkuperäisestä intensiteetistä kuitenkin vaikuttamatta säteilyn aallonpituusjakaumaan. Tällaisia suotimia kutsutaan ND-suotimiksi (eng. *neutral density*). Niitä käytetään esimerkiksi ilmaisimen saturoitumisen estämiseen kuvattaessa hyvin kirkkaita kohteita, kun kamerasen dynaaminen alue ei muuten riitä. [18, s. 126 – 128]

Osa suotimista puolestaan rajaa sen läpi pääsevän säteilyn aallonpituuskaistaa. Niitä kutsutaan spektraalisiksi suotimiksi, joita on erityyppisiä: SP-suodin (eng. *short-pass*) päästää lävitseen tietty aallonpituutta lyhemmät aallonpituudet, LP-suodin (eng. *long-pass*) tiettyä aallonpi-

tuutta pidemmät aallonpituudet ja BP-suodin (eng. *bandpass*) tietyn aallonpituuskaistan. Spekt-raalista suodinta voidaan käyttää niin kutsuttuna kylmäsuotimena, joka sijaitsee jäähdytettyjen sensorien jäähdytetyllä alueella. Ne vähentävät varsin tehokkaasti kameran komponenttien sä-teilyn aiheuttamaa häiriötä. Suotimien käytöllä on vaihtelevia sovellusmahdollisuuksia. Esimer-kiksi käytettäessä MWIR-alueen kamerassa BP-suodinta, joka päästää lävitseen vain aallonpi-tuuskaistaa, jolla hiilidioksidi absorboi ja emittoi vahvasti, kameralla kyetään havaitsemaan varsin tehokkaasti esimerkiksi ajoneuvoista peräisin olevia ympäristöään lämpimämpiä hiilidioksidipitoi-suuden keskittymiä, sillä myös kaasujen emittoiman säteilyn aallonpituusjakauma ja intensiteetti riippuu niiden lämpötilasta. Spektraalisten suotimien toiminta perustuu heijastuksiin, jotka johtu-vat interferenssi-ilmiöistä. Sopivat interferenssi-ilmiöt saadaan aikaan monikerroksisilla ohutkal-vopinnoitteilla, joilla on juuri sopiva paksuus ja taitekerroin.

Liki kaikki infrapuna-alueen korkean suorituskyvyn ilmaisimet joudutaan jäähdyttämään hyvin matalaan, tyypillisesti liki $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilaan kohinan laskemiseksi hyväksyttävälle tasolle [10, s. 368]. Ilmaisimen jäähdyttämiseen on useita erilaisia teknisiä ratkaisuita, jotka sopivat eri-laisiin sovelluskohteisiin riippuen mm. sensorin toimintaympäristöstä, liikkumistarpeesta sekä odotetusta eliniästä. Erilaisia jäähdyttimiä ovat mm. Stirling- (avoin kierto), Joule-Thompson- (sul-jettu kierto) ja Peltier-jäähdyttimet sekä kylmällä aineella täytetyt dewar-astiat. Stirling jäähdytti-mien etuja ovat pieni koko, tehokkuus ja luotettavuus, mutta niiden heikkoja puolia ovat korkea virran tarve, rajallinen käyttöikä ja hinta. Ne vaativat useamman minuutin jäähtyäkseen tyypilli-sesti vaadittuun noin $-200\text{ }^{\circ}\text{C}/73\text{ K}$ lämpötilaan. Stirling jäähdyttimillä voidaan kuitenkin saavuttaa jopa 15 K lämpötiloja. [2, s. 30 – 33; 18, s. 117] Stirling jäähdytin on termodynaamisesti varsin monimutkainen. Sen toiminta perustuu suljettuun kiertoon, joka koostuu kahdesta mäntäsylinteri yhdistelmästä ja termisestä regeneraattorista, jonka läpi kaasua, tyypillisesti heliumia, pumpataan sykleittäin. Prosessin seurauksena jäähdyttimen toinen pää jäähtyy. [8, s. 389 – 390; 20, s. 323 – 325]

Jäähdytetyt ilmaisimet pitää eristää ympäristöstään, jotta ne kykenevät toimimaan tarkoi-tuksenmukaisesti. Sen lisäksi, että ne pitää eristää ympäristöstään termisesti, ne täytyy eristää myös ympäröivästä väliaineesta, tyypillisesti ilmasta. Tämä tarkoittaa ilmaisimen pakkaamista tyhjiöön. Jos ilmaisimen ympärillä olisi ilmaa, ilman sisältämä vesi tiivistyisi ilmaisimen pinnalle. Terminen- ja tyhjiöeristys toteutetaan tyypillisesti dewar-astian avulla. dewar-astia on kaksiseinäi-nen säiliö, jonka sisällä on tyhjiö. Lisäksi ilmaisimen ympärillä voi olla erillinen kylmäsuoja. Koska ilmaisimen tulee kyetä keräämään säteilyä näkökentästään, ilmaisinta ympäröivissä rakenteissa tulee olla infrapunasäteilyä läpäisevät ikkunat, jotka ovat tyypillisesti pinnoitettu heijastuksenes-topinnoitteilla. Lisäksi dewar-astian sisään sijoitetaan usein erillinen kylmäsuodin, jonka tehtävä on rajata ilmaisimelle päätyvä säteily sopivalle aallonpituusvälille. Tyhjiöikkuna ja kylmäsuodin ovat erillisiä komponentteja pääasiassa mekaanisen kestävyysden takia. [2, s. 33; 8, s. 373 – 375] Kuvassa 13 on esitetty esimerkki jäähdytetyn kuvantavan infrapunasensorin keskeisistä kom-ponenteista.

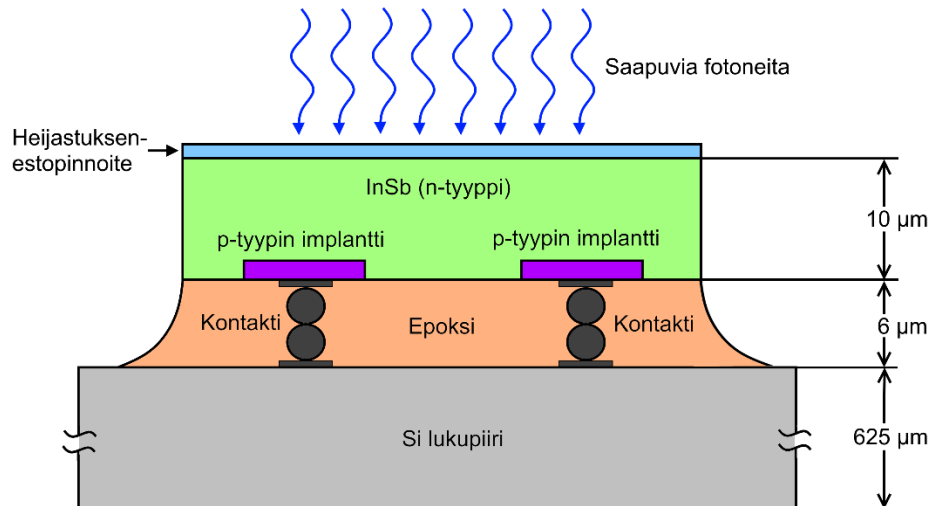


Kuva 13. Esimerkki jäähdytetyn kuvantavan infrapunasensorin sisäisestä rakenteesta. Mukailtu lähteistä [2, s. 33; 8, s. 354; 21, s. 2].

Kuvantavat sensorit voivat toimia perustuen kahteen erilaiseen konseptiin. Ne voivat olla joko tuijottavia (eng. *staring*) tai skannaavia. Tuijottavissa systeemeissä näkökentän koko kuva projektoidaan jatkuvasti koko ilmaisimelle. Skannaavissa systeemeissä taas hienomekaanisista komponenteista ja peileistä koostuvan skannerin avulla kuva projektoidaan ilmaisimelle ajan funktiona tietty osa kuvasta kerrallaan. Tässä tapauksessa ilmaisimessa on vain suhteellisen pieni määrä ilmaisinelementtejä/pikseleitä. [18, s. 102] Moderneissa korkealaatuisissa sensoreissa yhden pikselin koko on luokkaa $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ [18, s. 105].

Tässä työssä käytetty sensori toimii tuijottavalla periaatteella. Tällä periaatteella toimivassa sensorissa on ilmaisimatriisi (eng. *Focal Plane Array*, FPA), jossa on yksi ilmaisinelementti jokaista kuvapistettä kohti. Tuijottavan rakenteen etuja skannaavaan verrattuna ovat hienomekaniikan puuttuminen ja se, että jokainen pikseli pystyy havainnoimaan omaa näkökenttäänsä samanaikaisesti ja jatkuvasti, mikä vähentää kohinan vaikutusta ja mahdollistaa suuremman kuvausnopeuden. [18, s. 103 – 104] Haittana on se, että FPA:n ilmaisinelementit eroavat hieman herkkyydeltään toisista saman ilmaisimen ilmaisinelementeistä, mikä johtuu niiden valmistamiseen liittyvistä teknisistä rajoitteista ja materiaalin virheistä [18, s. 108]. [22, 23] Jokaisen ilmaisinelementin kyky siirtää havaitsemansa signaali sähköisessä muodossa eteenpäin vaihtelee hieman. Lisäksi rakenteestaan riippuen lukupiiri voi aiheuttaa virhettä esimerkiksi jokaiselle ilmaisinelementtisarakkeelle. [24] Tämän haittatekijän vaikutuksia ja ratkaisua sen vaikutusten vähentämiseksi on esitelty luvussa 3.4.1. Nykyään tuijottavat sensorit ovat huomattavasti skannaavia sensoreita suosittuja kuvaavissa infrapunasensoreissa [18, s. 104].

FPA koostuu kahdesta osasta: säteilyn sähköiseksi signaaliksi muuttavasta infrapunailmaisimesta ja tyypillisesti piistä valmistetusta lukupiiristä eli ROIC:sta (eng. *Readout Integrated Circuit*), jotka on liitetty toisiinsa sähköisellä kontaktilla. Ilmaisimia käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa. ROIC:illa on kaksi tehtävää. Ensinnäkin se lukee ilmaisimen muodostaman signaalin ja toiseksi se suorittaa signaalin vahvistamisen sekä integroinnin tai multipleksoi ja muuttaa signaalin sähköisestä muodosta digitaaliseen muotoon. ROIC ja ilmaisim voidaan valmistaa joko



Kuva 14. Poikkileikkaus InSb-fotodiodisensorista. Mukailtu lähteestä [2, s. 326].

yhdestä yhtenäisestä piin palasesta litografian, etsauksen ja ohutkalvopinnoituksen avulla tai hybridityyllä valmistamalla molemmat komponentit erikseen ja liittämällä ne yhteen. [18, s. 104] ROIC:t valmistetaan nykyään tyypillisimmin joko CCD- (eng. *Charge Coupled Device*) tai CMOS- (eng. *Complementary-Metaloxide-Semiconductor*) tekniikalla [2, s. 651]. Tarkempi kuvaus ROIC:n ominaisuuksista löytyy Rogalskin kirjasta *Infrared detectors* osasta IV [2]. Kuvassa 14 on esitetty esimerkki infrapunasensorin rakenteesta.

3.2.1 Ilmaisintyytit

Infrapunailmaisimia on useita eri tyyppisiä. Niitä esitellään varsin kattavasti Antoni Rogalskin teoksessa *Infrared Detectors* [2]. Ilmaisimen tehtävä on muuttaa niille saapuva säteily sähköiseksi signaaliksi ja sitä voidaan pitää sensorin keskeisimpänä komponenttina, joka merkittävältä osin määrittää koko sensorin suorituskyvyn. [18, s. 73]. Karkein jako infrapunailmaisimen välillä tehdään termisten ja fotoniperiaatteella toimivien kvantti-ilmaisimen välille (eng. *photon detector* tai *quantum detector*) [12]. Termiset sensorit mittaavat säteilyn aiheuttamaa sensorelementin lämpötilan muutosta. Sensorin lämpeneminen aiheuttaa sähköisen signaalin, jonka ilmaisimen lähettää eteenpäin. Termisten sensorien herkkyys on varsin heikko, mutta niiden etuja ovat mm. ilmaisimen jäähdytyksen tarpeettomuus ja kaistan leveys [17]. Jäähdytyksen tarpeettomuus mahdollistaa niiden hyödyntämisen mm. sovelluksissa, joissa kestävyys, keveys ja hyvin kompakti koko ovat erityisen tärkeitä. [1] Lisäksi termiset sensorit ovat verrattain edullisia valmistaa [2]. Termiset ilmaisimet soveltuvat heikon herkkyytensä takia parhaiten sovelluksiin, joissa säteilyn intensiteetti on verrattaan korkea [5].

Termisiä ilmaisimia on monia eri tyyppisiä ja niiden toiminta perustuu vaihteleviin fysikaalisiin ilmiöihin. Kuitenkin, kaikkien termisten ilmaisimen toiminnan perusperiaate on samanlainen: niiden ilmaisinelementit ovat hyvin eristettyjä ja ilmaisinelementtien lämpötila riippuu niihin osuvan infrapunasäteilyn tehosta. Se, kuinka ilmaisinelementin lämpötila muutetaan sähköiseksi signaali-

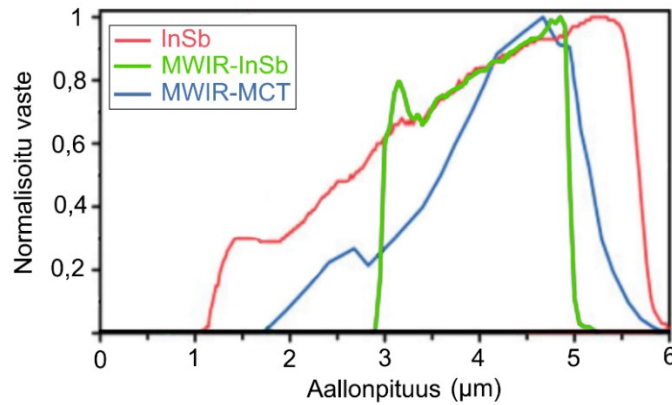
liksi, vaihtelee ilmaisintyyppistä riippuen. Esimerkiksi bolometri-tyyppiset ilmaisimet mittaavat lämpötilan muutoksen aiheuttamaa resistanssin muutosta ja Golayn kenno -tyyppiset sensorit mittaavat vakiotilavuudessa olevan kaasun paineen muutosta. [1, 2]

Kvantti-ilmaisimet on liki poikkeuksetta valmistettu puolijohdemateriaaleista. Ilmaisimelle päätyvät fotonit absorboituvat puolijohdemateriaaliin ja valoilmioiden (eng. *photo effect*) seurauksena ne aiheuttavat elektronien siirtymisen johtavuusvyölle ja näin ollen varauksenkuljettajien muodostumisen. Kyseisiin valoilmiöihin lukeutuvat mm. fotojohtavuus (eng. *photoconductivity*) ja fotojännite (eng. *photovoltaic*), jotka ovat ainoat laajalti hyödynnetyt ilmiöt [2, s. 176]. Varauksenkuljettajat ovat ilmaisimateriaalista riippuen joko elektroni-aukko-pareja, tai pelkkiä positiivisia tai negatiivisia varauksenkuljettajia. [8, s. 276]

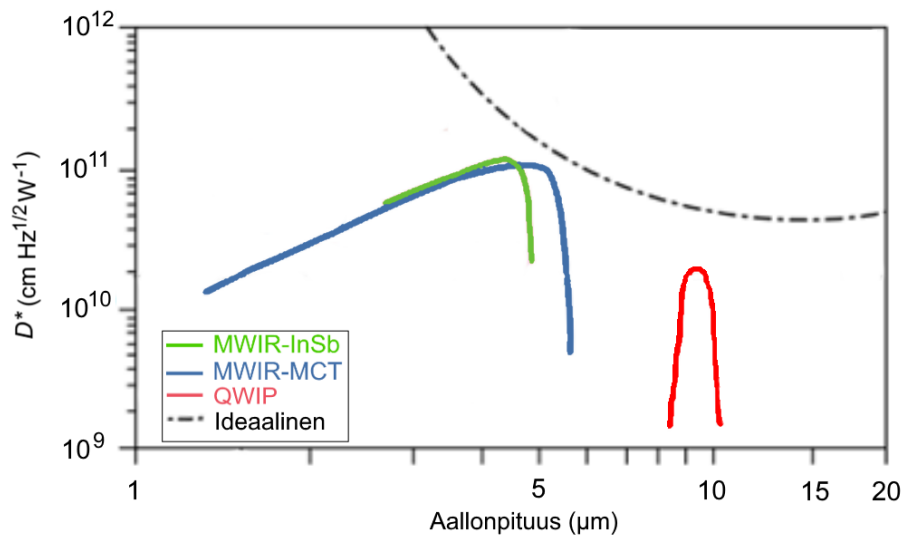
Kvantti-ilmaisimet joudutaan käytännössä aina jäähdyttämään hyvin alhaisiin lämpötiloihin, jotka ovat tyypillisesti luokkaa $-196\text{ °C}/77\text{ K}$. Kyseinen lämpötila voidaan saavuttaa nestemäisen typen avulla. Ilman ilmaisimen jäähdytystä lämpöliikkeestä johtuvat elektronien transitiot aiheuttaisivat hyvin suuren määrän kohinaa, joka peittäisi ilmaisimelle saapuvan signaalin allensa. Kvantti-ilmaisimen merkittävimmät edut termisiin ilmaisimiin verrattuna ovat kertaluokkia parempi herkkyys sekä hyvin nopea vaste. [1; 2; 8, s. 276] Tämän vuosikymmenen alussa parhaiden termisten ilmaisimien NETD oli noin 45 mK ja parhaiden kvantti-ilmaisimien noin 10 mK kohteen pintalämpötilalla 30 °C [18, s. 105].

Kvantti-ilmaisimet voidaan jakaa useisiin alaluokkiin perustuen niiden täsmällisempään toimintaperiaatteeseen. Tärkeimmät kvantti-ilmaisintyytit ovat fotojohtavuus-, fotojännite- ja fotodiiodi-ilmaisimet, fotoemissiiviset ilmaisimet sekä kvanttikaivo infrapunafotoilmaisimet (eng. *Quantum Well Infrared Photodetectors*, QWIP). [2; 12; 18, s. 91] Eräs kvantti-ilmaisinten ominaisuus on niiden vasteen riippuvuus aallonpituudesta [8, s. 276].

Kvantti-ilmaisimia voidaan valmistaa useista eri puolijohdemateriaaleista, joihin usein lisätään pieniä määriä tiettyjä seosaineita. Tyypillisimpiin materiaaleihin kuuluvat InSb sekä HgCdTe (eng. *cadmium mercury telluride*, CMT/MCT). Ilmaisimen vastealue on se aallonpituuskaista, jolla se kykenee muuttamaan säteilyä sähköiseksi signaaliksi. Kvantti-ilmaisimen vastealue riippuu materiaalista, josta se on valmistettu. Tietty materiaalit soveltuvat vasteensa puolesta käytettäväksi tietyillä aallonpituusalueilla ja tarkemmin vastealueita voidaan säätää muuttamalla materiaalin seossuhdetta. Esimerkiksi InSb:n tapauksessa In:n ja Sb:n suhdetta [18, s. 93]. Lisäksi vastealuetta voidaan säätää lisäämällä materiaaliin pieniä määriä seosaineita, kuten germaniumia (Burstein-Moss ilmiö) [2, s. 313, 321]. Kuvassa 15 on esitetty InSb:n sekä MWIR-kaislalle seostamalla räätälöityjen InSb:n ja MCT:n spektraaliset vasteet. Kuvassa 16 taas on esitetty InSb-, MCT- ja QWIP-ilmaisimien normalisoidut ilmaisevuudet. Kuvista nähdään, että MCT:stä ja InSb:sta valmistettujen ilmaisimien ominaisuudet ovat keskenään varsin samankaltaiset. Huomionarvoista on, että ilmaisimen ominaisuudet voivat kuitenkin vaihdella riippuen mm. valmistusparametreista ja seossuhteista.



Kuva 15. Muutaman suosituksen MWIR-alueen ilmaisimateriaalin normalisoidut spektraaliset vastet. MCT tarkoittaa HgCdTe-ilmaisimateriaalia. Mukailtu lähteestä [18, s. 119]



Kuva 16. Eri ilmaisimateriaaleista valmistettujen ilmaisimen normitettuja ilmaisevuuksia infrapuna-alueella jäähdytettynä 77 K lämpötilaan. Katkoviiva esittää ideaalisen fotojänniteilmaisimen normitettua ilmaisevuutta. (Ilmaisimen näkökenttä puolipallo 300 K taustaan.) Mukailtu lähteestä [18, s. 76].

Tässä työssä käytetyssä infrapunakamerassa oli InSb:sta valmistettu kvanttiperiaatteella toimiva ilmaisim. InSb on III – V tyyppin puolijohde, joka soveltuu erinomaisesti käytettäväksi ilmaisimateriaalina MWIR-kaistan sensoreissa, sillä sen vastealue kattaa noin aallonpituudet 1 – 5 μm . Sen ominaisuuksia ovat erinomainen herkkyys ja siihen liittyvän ilmaisinteknologian suhteellinen yksinkertaisuus. InSb:n energiavyön suuruus on 77 K lämpötilassa 0,23 eV, mikä vastaa 5,5 μm aallonpituuden omaavan fotonin energiaa. Tämän takia InSb:a ei voida käyttää LWIR-kaistan ilmaisimateriaalina. InSb:sta voidaan valmistaa usealla eri toimintaperiaatteella, kuten fotojännite- ja fotojohtavuusperiaatteella, toimivia ilmaisimia. Merkittävin ero näiden kahden toimintaperiaatteen välillä on, että fotojänniteperiaatteella toimivassa ilmaisimessa ei käytetä ulkoista jännitettä, mutta fotojohtavuusilmaisimessa käytetään. [2, s. 321 – 325; 18, s. 91 – 94]

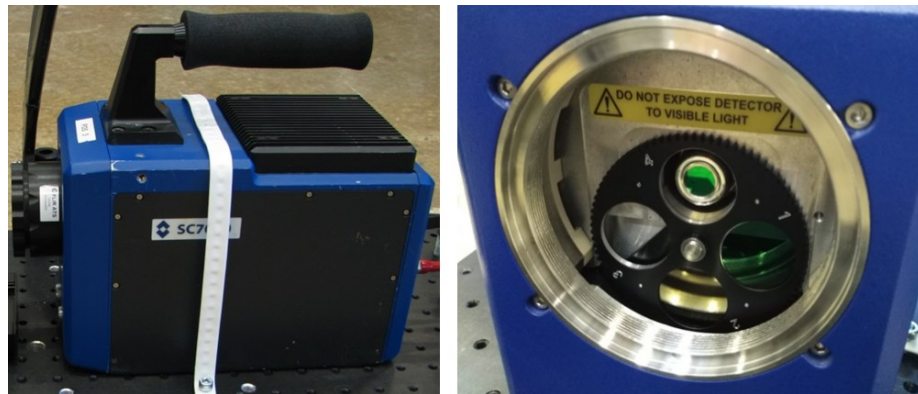
3.2.2 FLIR SC7600 -sarjan infrapunakamera

Tämän työn kokeellisessa osuudessa liki yksinomaan käytetty infrapunakamera oli FLIR SC7600 -sarjan MWIR-kaistan kamera, jonka tärkeimpiä teknisiä ominaisuuksia on listattu Taulukossa 6. Kamera on esitetty Kuvassa 17. Kyseinen kamera on valmistajan mukaan tarkoitettu lähinnä tutkimus- ja kehityskäyttöön ja sen ominaisuuksiin mainitaan kuuluvan korkea herkkyys, hyvä spatiaalinen resoluutio ja kuvausnopeus [25]. Kamerassa oli indiumantimonidi (InSb) ilmaisimen. Ilmaisimen vaste on esitetty Kuvassa 18. Kuvaaja perustuu valmistajan ilmoittamaan dataan ja se vastaa varsin hyvin Kuvassa 15 esitettyä MWIR-kaistan InSb-ilmaisimen spektraalista vastetta. Merkittävimpänä erona on vastealueen jatkuminen hieman lyhemmille aallonpituuksille. Kameran vaste on ominaisuus, joka pysyy vakiona tietyllä optiikalla.

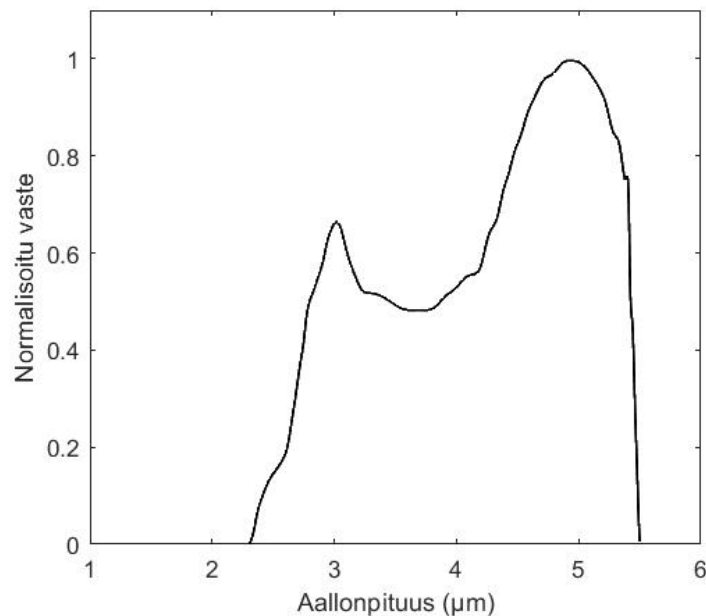
Kamerassa on neliasemainen motorisoitu suodinpyörä, jonka avulla kamerassa voidaan käyttää neljää eri suodinta, joilla kameran vasteen aallonpituusalue ja herkkyys kyetään säätämään. Lisäksi kamerassa on kylmäsuodin, joka on paikallaan kameran jäähdytetyssä osassa käytännössä aina. Kamerassa on säädettävä integrointiaika ja se kykenee Multi-IT-toiminnon avulla mittaamaan samassa tilanteessa jopa neljällä eri integrointiajalla. Kamera mittaa oman runkonsa ja ilmaisimensa lämpötilaa ja tallentaa ne mittauksen metadataan. Kameran optiikassa on manuaalinen tarkennus sekä vakiosuurenno ja näkökenttä, joita voi muuttaa vain vaihtamalla optiikkaa. Kameran ilmaisin jäähtyy toimintakuntoiseksi noin viidessä minuutissa kameran käynnistämisestä.

Taulukko 6. Tässä työssä käytetyn FLIR SC7600 -sarjan kameran keskeisiä teknisiä ominaisuuksia.

Ilmaisintyyppi	InSb
Resoluutio	640 x 512
Pikselikoko	14 μm
Pikselijako	15 μm
Spektrialue	2,3 – 5,5 μm (MWIR)
Maksimi kuvaustaajuus	100 Hz
NETD	< 25 mK
Dynaaminen alue	14 bit
Jäähdytintyyppi	Sisäinen Stirling
Ilmaisimen lämpötila	Noin 77 K/ -196 °C
Kaivon kapasiteetti	6,5 M elektronia
Käytetty optiikka	50 mm - 11°x 8.8°



Kuva 17. Työn kokeellisessa vaiheessa käytetty FLIR SC7600 -sarjan MWIR-kaistan kamera "Titanium". Oikeanpuoleisessa kuvassa linssin ollessa irrotettuna on näkyvissä tyhjiön ikkuna sekä pyörivä 4-asemainen suodinkiekko, jossa on kiinni kaksi suodinta paikoilla 1 ja 2.



Kuva 18. Työn kokeellisessa osuudessa käytetyn FLIR SC7600 -sarjan infrapunakameran ilmaistimen valmistajan ilmoittama spektraalinen vaste.

3.3 Kameran havaitsema signaali

Infrapunakaistalla suoritettaviin absoluuttisiin mittauksiin liittyy haasteita. Jotta tarkkoja absoluuttisia mittauksia kyettäisiin suorittamaan, infrapunakameran toiminta ja erityisesti mitatun signaalin komponentit on tunnettava. Tässä luvussa käydään läpi komponentit, joista kameran näkökentästä peräisin olevan signaali koostuu sekä erilaisia kohinan lähteitä, jotka summautuvat signaaliin ja aiheuttavat mittauksiin epätarkkuutta.

3.3.1 Kameralle päätyvä signaali

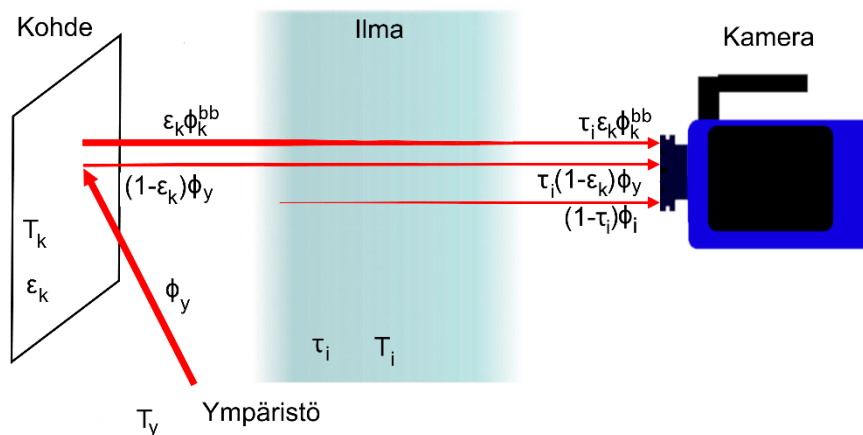
Mitattavasta kohteesta infrapunakameralle saapuva signaali koostuu useasta komponentista. Tyypillisesti suuri osa signaalista on kohteen (ja taustan) emittoimaa termistä säteilyä. Tässä työssä ei ole tarvetta tehdä eroa kohteen ja tausta välille, joten jatkossa puhutaan ainoastaan kohteesta. Kohteen emittoima säteilyvuo riippuu kohteen pintalämpötilasta T_k Planckin lain mukaisesti sekä kohteen pinnan emissiivisyydestä ε_k . Lisäksi kohde heijastaa ympäristöstään peräisin olevaa säteilyä. Kohteen ympäristöstään heijastaman säteilyn säteilyvuo riippuu kohteen heijastavuudesta r_k ja ympäristön säteilyvuosta ϕ_y , joka puolestaan riippuu ympäristön lämpötilasta T_y . Lämpikuultamattomilla pinnoilla heijastavuuden ja emissiivisyyden välillä on yhteys $r_k = 1 - \varepsilon_k$ (katso luku 2.3).

Ilmakehällä on hyvin merkittävä vaikutus kameralle päätyvään signaaliin. Ilmakehä vaimentaa säteilyä, mikä johtuu sen molekyylien ja partikkelien absorptio- ja sirontaprosesseista (katso luku 2.4), joista normaaleissa olosuhteissa, kun ilmassa ei ole merkittävää määrää partikkeleja, infrapunakaistalla absorptio on prosesseista hallitseva. Vaimenemista voidaan kuvata kertomalla kohteelta peräisin oleva säteilyvuo ilman läpäisevyydellä τ_i . Lisäksi ilmakehä emittoi säteilyä, mikä on myös otettava huomioon. Ilman emittoima säteilyvuo ϕ_i riippuu ilman lämpötilasta T_i ja ilman läpäisevyydestä τ_i . Kameralle saapuva säteilyvuo ϕ_{kam} voidaan laskea kaavalla:

$$\phi_{kam} = \tau_i \varepsilon_k \phi_k^{bb} + \tau_i (1 - \varepsilon_k) \phi_y + (1 - \tau_i) \phi_i, \quad (23)$$

missä ϕ_k^{bb} on kohteen lämpöisen mustan kappaleen säteilijän emittoima säteilyvuo. Kameralle päätyvän signaalin komponentteja on havainnollistettu Kuvassa 19.

Mikäli mitataan kohdetta, joka kameran vastealueella emittoi ja heijastaa enemmän säteilyä kuin ilma emittoi, ilman kokonaisvaikutus säteilyyn on vaimentava. Tämä tyypillisesti toteutuu, jos mitattava kohde on ympäristöään lämpimämpi. Jos taas kohde on ilmaa kylmempi, ilma emittoi enemmän säteilyä kuin absorboi, jolloin kokonaisvaikutus on vahvistava. Kaasujen emission laskeminen esitetään esimerkiksi Vollmerin ja Möllmannin teoksessa *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications* [18].



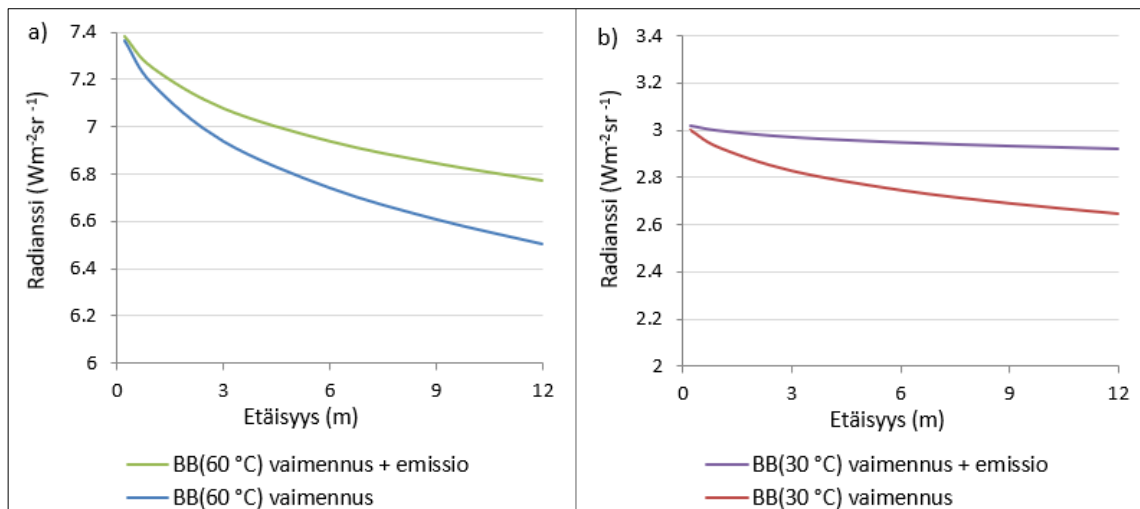
Kuva 19. Kohteesta infrapunakameralle päätyvän signaalin komponentit. Mukailtu lähteestä [18, s. 98].

Ilmakehän aiheuttamaa vaimennusta voidaan tarkemmin arvioida Bouguer'n lain avulla. Kyseinen laki tunnetaan myös Beerin lakina, Lambertin lakina tai Beerin-Lambertin lakina.

$$\phi_1 = \phi_0 \cdot e^{-\bar{\tau}_i} = \phi_0 \cdot T_i, \quad (24)$$

missä ϕ_1 on säteilyvuo ilmakehän vaimennuksen jälkeen, ϕ_0 säteilyvuo ennen ilmakehän vaimennusta, T_i ilmakehän läpäisevyys tietyllä matkalla ja $\bar{\tau}_i$ ilmakehän optinen paksuus, joka riippuu ilmakehän kaasujen, erityisesti veden ja hiilidioksidin, pitoisuuksista sekä ilmakehässä kuljetun matkan pituudesta. Optinen paksuus on määritelty tarkemmin esimerkiksi lähteessä [18]. Ilmakehän läpäisevyys ja täten myös vaimennus riippuu säteilyn kulkemasta matkasta eksponentiaalisesti, kuten kaavasta 24 voidaan päätellä. [18, s. 97 – 101]

Tätä työtä tehdessä ilmakehän vaimennus kameran spektrivasteen alueella (Kuva 18) laskettiin MATLAB-funktion avulla. Funktiossa hyödynnettiin HITRAN-tietokantaa. Tietokantaan on koottu kokeellisesti ja laskennallisesti määritettyjä spektroskooppisia parametreja, joita voidaan hyödyntää simuloitaessa ilmakehän emissiota ja läpäisyä [26]. Funktion on alun perin kirjoittanut Jaakko Tarhasaari osana diplomityötään [27]. Funktiolle syötettiin lähtötiedoiksi ilman lämpötila, ilmankosteus, hiilidioksidipitoisuus sekä ilmapaine. Kuvassa 20 on esitetty MATLAB-funktion avulla laskettu 60 °C:n (a) ja 30 °C:n (b) lämpöisten ideaalisten mustan kappaleen säteilyiden vaimeneminen välillä 0,2 – 12 m lämpötilassa 20 °C, ilman suhteellisella kosteudella 40 % ja hiilidioksidipitoisuudella 400 ppm normaalissa ilmapaineessa $1,013 \cdot 10^5$ Pa. Säteilyn edetessä ilmakehässä sen radianssi heikentyy eksponentiaalisesti. Enemmän vaimenevassa käyrässä on huomioitu ainoastaan ilmakehän absorptio ja vähemmän vaimenevassa sekä ilmakehän absorptio että emissio. Ympäristön lämpöisen kohteen radianssi etäisyyden funktiona olisi likimain vakio. Huomion arvoista on, että lämpimämmän mustan kappaleen radianssi heikenee nopeammin.

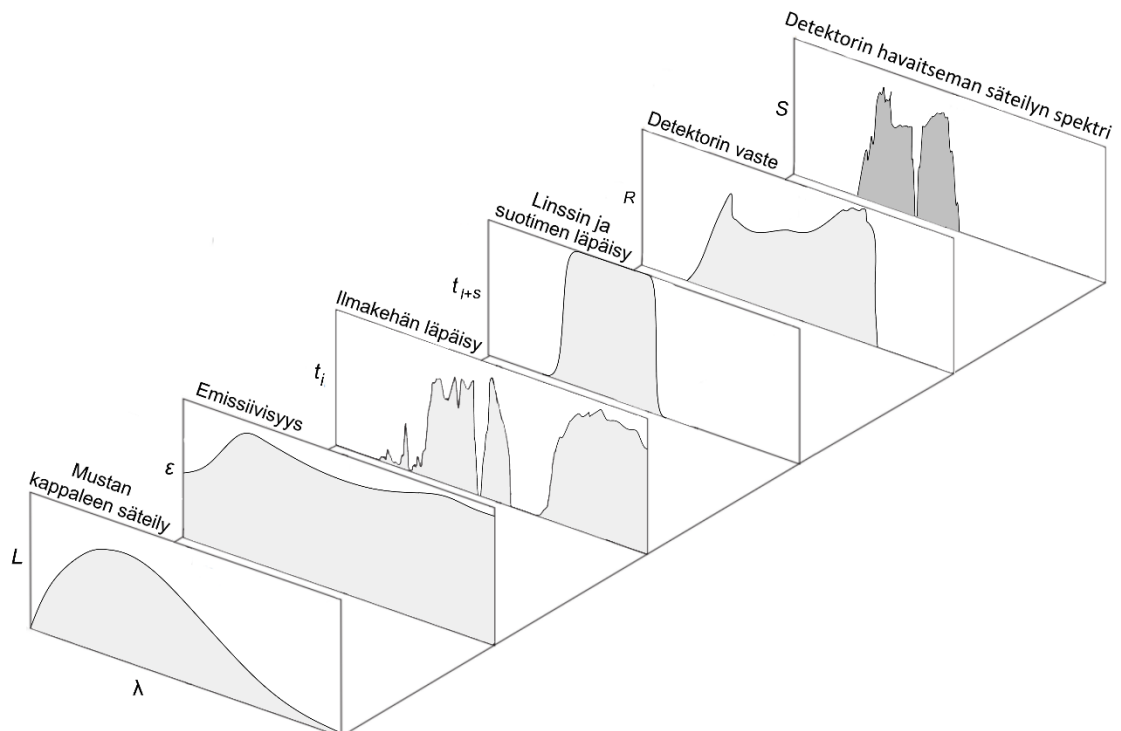


Kuva 20. Kahden ympäristöään lämpimämmän mustan kappaleen emittoiman säteilyn laskennallinen vaimeneminen ilmassa etäisyyden funktiona. Voimakkaampi säteily vaimenee nopeammin. Toisissa käyriä on huomioitu vain ilmakehän absorptio, toisissa sekä absorptio että emissio.

Ilmaisimen havaitsemaan signaaliin vaikuttavat signaalin kameran linssille saapumisen jälkeen vielä linssin läpäisevyys (liki 100 %), suotimen läpäisevyys sekä ilmaisimen herkkyys. Signaali koostuu siis useista eri komponenteista. Kuvassa 21 on esitetty tekijät, jotka vaikuttavat kohteen emittoimaan signaaliin sen päätyessä lopulta ilmaisimen havaitsemaksi signaaliksi. Vaikutukset voidaan kirjoittaa myös muotoon:

$$S_{\lambda} = L_{k\lambda}\varepsilon_{\lambda}\tau_{i\lambda}\tau_{(l+s)\lambda}R_{\lambda}, \quad (25)$$

missä S_{λ} on ilmaisimen havaitsema signaali (aallonpituuden funktiona), $L_{k\lambda}$ kohteen lämpöisen mustan kappaleen kaavan 11 mukaan emittoiman säteilyn spektraalinen radianssi, ε_{λ} kohteen spektraalinen emissiivisyys, $\tau_{i\lambda}$ ilmakehän spektraalinen läpäisevyys, $\tau_{(l+s)\lambda}$ linssin ja suotimen yhdistetty spektraalinen läpäisevyys ja R_{λ} ilmaisimen spektraalinen vaste. Tässä kappaleessa esitettyjen signaalin komponenttien lisäksi kokonaissignaaliin sisältyy vielä useasta lähteestä peräisin oleva kohina ja loissäteily, joihin tutustutaan tarkemmin seuraavissa luvuissa.



Kuva 21. Esimerkki kameran havaitsemaan säteilyn spektriin vaikuttavista tekijöistä. Mukailtu lähteestä [28, s. 4].

3.3.2 Kohina

Kohinana voidaan pitää kaikkia epätoivottuja osia signaalista. Infrapunakameroilla otetuissa kuvissa on aina kohinaa ja se on peräisin useasta eri lähteestä. Useiden lähteiden mukaan kohina on merkittävin infrapunakuvien laatuun vaikuttava tekijä ja infrapunakuville on tyypillistä suhteellisen heikko SNR-suhte. [29, s. 187] Kohina määrittää rajan sille, kuinka paljon kuvasta on mahdollista saada käyttökelpoista tietoa. Täten kohinan ja sen lähteiden ymmärtäminen on tärkeässä roolissa kuvantavilla infrapunasensoreilla suoritettavissa mittauksissa. [8, s. 304] Kohinan lähteitä

esitellään tarkemmin mm. Hudsonin kirjassa [8]. Tässä luvussa käydään läpi keskeisimmät kohinan lähteet.

Normaalin keskiarvon käyttäminen ei toimi kohinan suuruuden arvioimisessa, sillä kohinan aiheuttaman arvojen vaihtelun keskiarvo on noin 0. Sen sijaan kohinan suuruutta kuvataan tyypillisesti neliöllisellä keskiarvolla (rms-arvo, eng. *root mean square*), joka poistaa negatiivisten arvojen vaikutuksen. Toisistaan erillisten kohinan lähteiden yhteisvaikutusta voidaan arvioida lasquemalla neliöjuuri niiden neliöiden summasta. [8, s. 304 - 305]

Yksi kohinan aiheuttaja on säteilykohina (tai fotonikohina). Se johtuu säteilylähteiden emittoiman säteilyn määrän hienoisesta statistisesta vaihtelusta, sillä fotonien emissioon liittyy sattumanvaraisuuksia ja todennäköisyysjakaumia. [5, s. 232] Tämän tyyppinen kohina johtuu mittauksen kohteena olevan kohteen ja sen taustan säteilyn synnyn takana olevien fysikaalisten prosessien ominaisuuksista eikä sille käytännössä voida mitään.

Toinen merkittävä kohinan aiheuttaja on ilmaisimien. Ilmaisimessa aiheutuva kohina on pääasiassa peräisin kahdesta lähteestä: varauksen kantajien kineettisen energian satunnaisesta vaihtelusta, mikä aiheuttaa elektronien virittymisen johtavuusvyölle, sekä varauksenkantajien esiintymistiheyden satunnaisuudesta. Ne aiheuttavat kohinaa, vaikka ilmaisimelle ei saapuisi ollenkaan säteilyä. [2, s. 182] Tästä syystä tämän tyyppistä kohinaa kutsutaan usein pimeävirraksi. Näiden prosessien aiheuttaman kohinan suuruus riippuu vahvasti ilmaisimen lämpötilasta. Mitä matalampi lämpötila on, sitä vähemmän kohinaa. [18, s. 90 – 91] Tästä syystä kvantti-ilmaisimet on tyypillisesti jäähdytetty hyvin alhaisiin, tyypillisesti noin 77 K lämpötiloihin. Tällöin hyvin paljon harvemmillä varauksenkuljettajilla on riittävästi energiaa siirtyä johtavuusvyölle ja tulla havaituksi osana kokonaissignaalia. [2, s. 59] Esimerkiksi jäähdyttämällä fotojohtavuusperiaatteella toimivan ilmaisimen 300 K:stä 77 K:iin, sen ilmaisevuus paranee yli 100-kertaisesti [2 s. 323].

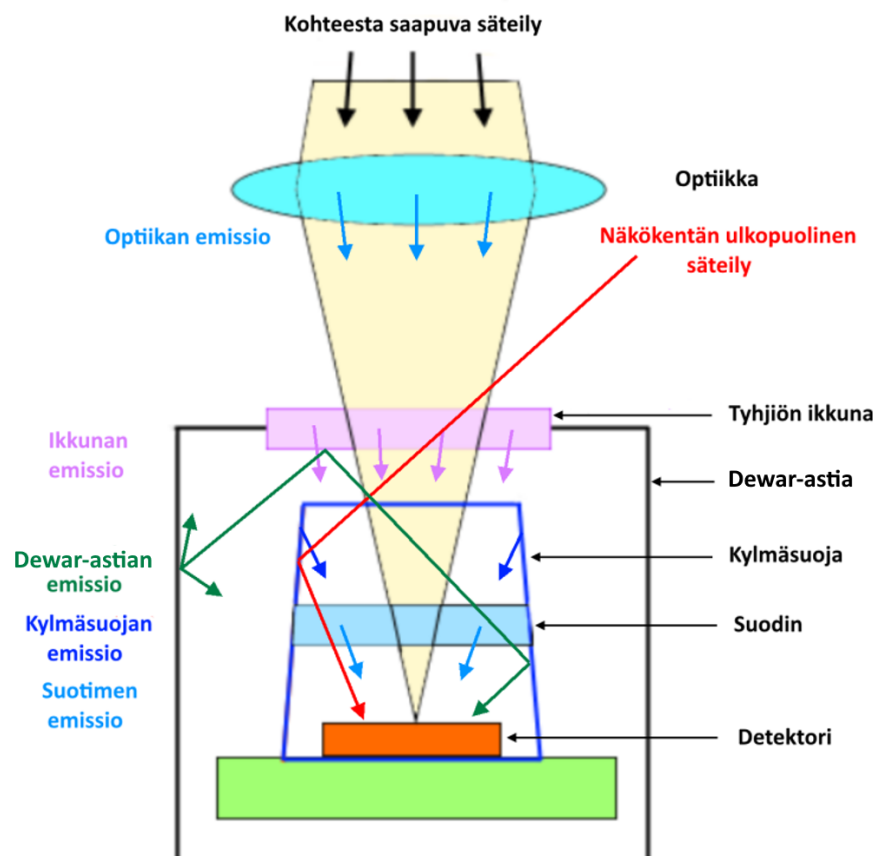
Kolmas kohinan aiheuttaja on signaalin ilmaisimelta eteenpäin siirtävä lukuelektroniikka. Sen aiheuttama kohina aiheutuu useasta erilaisesta fyysisestä prosessista. Tätä kohinaa kutsutaan lukukohinaksi (eng. *readout noise* tai *read noise*). Se johtuu sensorin rakenteesta ja lukupiirin epätäydellisyydestä. Lukukohina on vakio ja se ei riipu kohteen herätteen voimakkuudesta tai integrointiajasta, mikä tarkoittaa, että sen merkitys korostuu käytettäessä mittauksissa lyhyitä integrointiaikoja. Lisäksi ilmaisimen lukupiirin epätäydellisyys ja ilmaiselementtien erot aiheuttavat kohinaa (eng. *fixed pattern noise*), joka ilmenee eroina tietyissä kuvan osissa. [30] Sitä käsitellään hieman tarkemmin luvussa 3.4.1.

Tässä työssä kohina jaetaan kahteen komponenttiin: pimeävirtaan ja lukukohinaan. Näiden kahden komponentin välillä on käytännön mittausten kannalta merkittävä ero. Pimeävirta kasvaa lineaarisesti integrointiajan mukaan, sillä pidemmän integrointiajan aikana useampi elektroni ehtii syntyään kohinaprosessien seurauksena. Näiden kohinakomponenttien vaikutusta havaittuun kokonaissignaaliin on havainnollistettu Kuvassa 23. Kohinan tarkkaa suuruutta on vaikea arvioida. Tämä on yksi tekijöistä, jotka hyvin merkittävästi hankaloittavat absoluuttisia mittauksia etenkin mitattaessa kohteita, joiden heräte on hyvin matala. Tällöin kohinan osuus kokonaissignaalista voi olla jopa suurempi kuin kohteesta peräisin olevan säteilyn aiheuttama osuus signaalista.

3.3.3 Loissäteily

Kuten luvussa 2.3 tarkemmin kuvailtiin, kaikki absoluuttista nollapistettä lämpimämmät kappaleet emittoivat säteilyä. Tämä koskee luonnollisesti myös infrapunakameran komponentteja. Kamera on suunniteltu siten, että se kerää tehokkaasti näkökentästään säteilyä ilmaisimelle. Kuitenkin, ilmaisimelle päätyy myös säteilyä, joka ei ole peräisin näkökentässä olevasta kohteesta, taustasta tai väliaineesta [31, s. 174]. Tämä ylimääräinen säteily, jota kutsutaan loissäteilyksi (eng. *parasitic radiation* [21], *stray light* tai *parasitic radiance* [32]) aiheuttaa häiriötä mittaukseen, sillä se summautuu kohteesta peräisin olevaan signaaliin. Loissäteilyä ovat mm. optiikan, dewar-astian, suotimien ja tyhjiöikkunan emissio sekä kameras näkökentän ulkopuolelta peräisin oleva kameras rakenteista heijastunut säteily. Loissäteilyn merkitys mittaustarkkuudelle absoluuttisia mittauksia suoritettaessa on hyvin merkittävä [32]. Kuvassa 22 on havainnollistettu loissäteilyn lähteitä. Loissäteilyä voidaan pitää myös kohinana aivan kuten edellisessä kappaleessa esitettyjä kohinan aiheuttajia, mutta tässä työssä sitä käsitellään erillisenä komponenttina.

Huomion arvoista on, että osa loissäteilystä syntyy kylmäsuotimen takana lähellä ilmaisina. Se tarkoittaa, että kyseisen säteilyn ei tarvitse läpäistä kylmäsuodinta saapuessaan ilmaisimelle, jolloin sen aallonpituusjakauma jää leveämmäksi verrattuna muuhun ilmaisimelle saapuvaan säteilyyn. Se tarkoittaa, että jos ilmaisimen vastealue on laajempi kuin kylmäsuotimen läpäisykaista, tämän säteilyn merkitys korostuu. Jäähdytetyissä MWIR-kaistan kameroissa on kui-

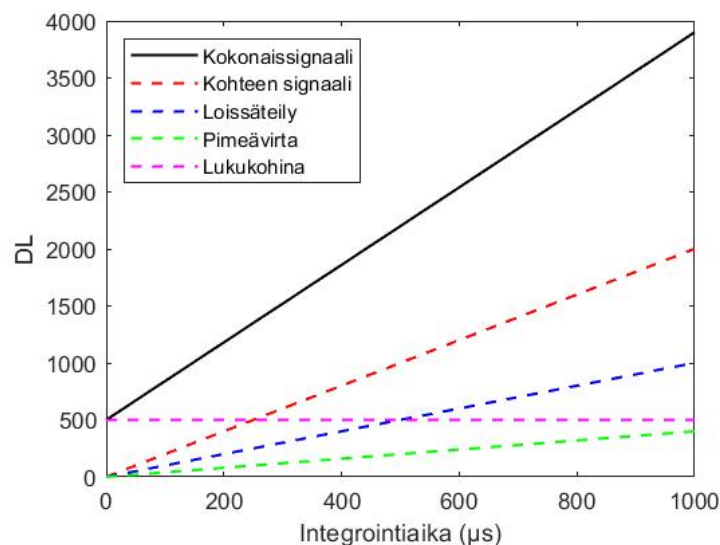


Kuva 22. Loissäteilyn lähteitä jäähdytetyssä infrapunakamerassa. [21]

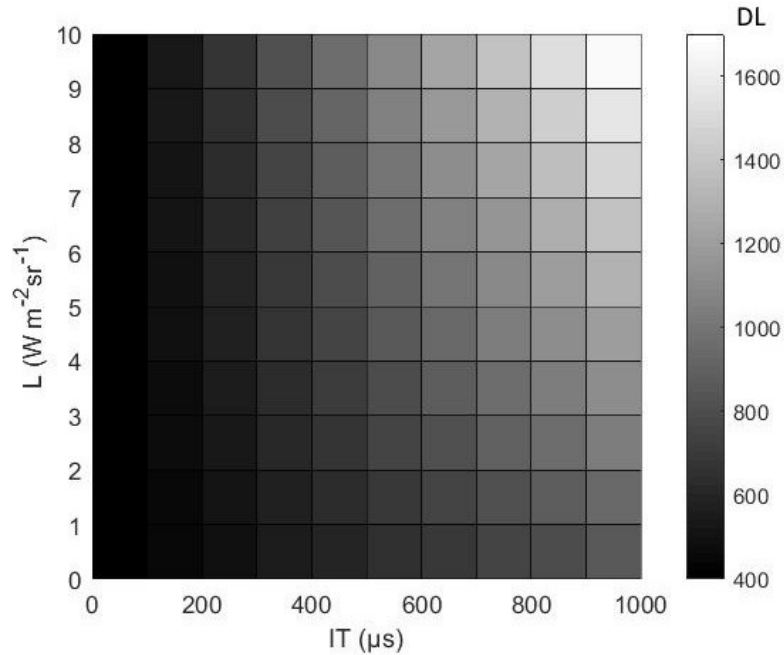
tenkin se etu, että ne komponentit, joista säteilyä voi päätyä suoraan kylmäsuotimen ohi ilmaisimelle, ovat erittäin kylmiä, joten ne emittoivat MWIR-kaistan säteilyä erittäin vähän. Kuitenkin, kameroissa, joissa ei ole kylmäsuodinta, tämä ongelma voi korostua huomattavasti. Loissäteilyn aiheuttamien haasteiden merkitys korostuu käytettäessä LWIR-kaistan jäähdyttämättömiä infrapunakameroita. Niiden tapauksessa loissäteilyn määrää voidaan pienentää ilmaisimen eteen asetetulla suojalla, joka on samassa lämpötilassa kuin ilmaisin. [33]

Loissäteilyn lähteitä ja määrää jäähdytetyssä LWIR-kaistan kamerassa on käsitelty mm. Jainin ja Biswasin artikkelissa [21]. Artikkelissa esitettyjen tulosten perusteella merkittävimmät loissäteilyn lähteet ovat järjestyksessä merkittävimmästä alkaen: optiikka, tyhjiön ikkuna ja dewarastian seinät. Muista lähteistä peräisin olevan loissäteilyn määrä on merkityksettömän pieni. Artikkelissa todetaan, että loissäteilyn määrä riippuu vahvasti kamerasäiliön lämpötilasta. Esimerkiksi kamerasäiliön lämpötilan laskiessa 30 °C:sta -20 °C:een loissäteilyn määrä väheni 65 % ja sen muutos tällä välillä oli varsin lineaarista. Loissäteilyn vaikutus on hyvin merkittävä etenkin mitattaessa matalaheijasteisiä kohteita, sillä tällöin loissäteilyn suhteellinen osuus signaalista on suurempi kuin mitattaessa korkeaheräteisiä kohteita. Lisäksi loissäteily kaventaa kamerasäiliön dynaamista aluetta. [21] Artikkelissa esitettyjen tulosten perusteella ei voida luotettavasti arvioida loissäteilyn määrää MWIR-kamerasäiliön tapauksessa, mutta niitä voidaan pitää suuntaa antavina.

Tässä työssä sensorin/kamerasäiliön antamaa ulostulosignaalin arvoa kutsutaan digitaalilukuarvoksi DL . Loissäteilyn ja kohinan vaikutusta digitaalilukuarvoon on havainnollistettu Kuvassa 23. Erityisen huomionarvoista on, että loissäteilyn ja pimeävirran komponentit signaalista kasvavat lineaarisesti integrointiajan kasvaessa, mutta lukukohina pysyy koko ajan vakiona. Tämä tarkoittaa, että lyhyillä integrointiajoilla lukukohinan osuus kokonaissignaalista kasvaa ja integrointiajalla 0 signaali koostuu ainoastaan lukukohinasta. Tilanteessa, jossa kamerasäiliölle ei saavu sen näkökentästä ollenkaan kohteesta tai väliaineesta lähtöisin olevaa säteilyä, signaalin nollassa kuitenkin kasvaa integrointiajan pidentyessä. Tämä johtuu siitä, että loissäteilystä ja pimeävirrasta koostuvat signaalin komponentit kasvavat. Tätä on kuvattu Kuvassa 24.



Kuva 23. Signaalin komponentteja mitattaessa kohdetta. Kokonaissignaali on kaikkien komponenttien summa.



Kuva 24. Havainnollistus kameran ulostulosignaalin eli digitaalilukuarvon DL riippuvuudesta integrointiajasta IT ja kohteen radianssista L .

3.4 Kalibrointiprosessi

Jotta infrapunakameroita voitaisiin käyttää absoluuttisten mittausten suorittamiseen, niille tulee suorittaa kaksi erityyppistä kalibrointia. Toisen kalibrointiprosessin osan tarkoitus on korjata ilmaisinelementtien/pikseleiden välisiä eroja ja toisen luoda tarkka yhteys mitatun säteilyn voimakkuuden ja kameran ulostulosignaalin arvon eli digitaalilukuarvon välille. Tässä luvussa käsitellään tarkemmin molempia kalibrointiprosesseja osia sekä kalibroinnin luotettavuuteen liittyviä haasteita.

3.4.1 NUC

NUC (eng. *Non-uniformity Correction*) on signaalin prosessointitoimenpide, joka voidaan suorittaa kuvantaville sensoreille, joissa on useita ilmaisinelementtejä. Tahdottaessa korkealaatuisia mittaustuloksia se joudutaan tekemään, koska jokainen FPA:n ilmaisinelementti on ominaisuuksiltaan hieman erilainen herkkyydeltään (eng. *gain*) ja poikkeamaltaan (eng. *offset*). Erot johtuvat mm. ilmaisimen valmistuksessa syntyneistä pienistä virheistä, lukukohinasta ja ilmaisinelementtien lämpötilaeroista. Lisäksi virhettä aiheuttaa Narcissus-ilmiö, joka johtuu optiikan sisäpinnan heijastuksista. [34] Jos NUCia ei ole suoritettu, infrapunakameralla otetuissa kuvissa on usein huomattavissa selkeitä raidoitumista, joka johtuu lukupiirin rakenteesta. Sama osa piiriä voi esimerkiksi lukea yhden ilmaisinelementtisarakkeen, jolloin kyseisen sarakkeen ilmaisinelementtien signaaleissa on yksittäisten ilmaisinelementtien virheiden lisäksi sama yhteinen virhekomponentti, joka eroaa toisista sarakkeista. Nämä kaikki edellä mainitut tekijät johtavat siihen, että eri

ilmaisinelementit antavat erisuuria arvoja, vaikka niille kaikille saapuisi kohteesta sama signaali. Tämän tyyppistä kohinaa kutsutaan englanniksi termillä *fixed pattern noise*. Ilman NUCin suoritusta eri pikselien arvot eivät siis ole keskenään vertailukelpoisia, minkä vaikutus näkyy tyypillisesti infrapunakuvassa hyvin selkeästi. [18]

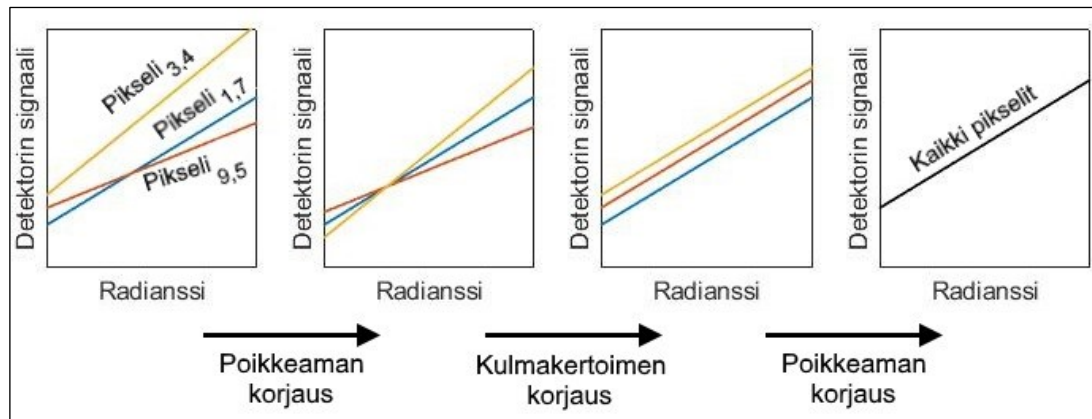
Käytännössä NUC suoritetaan asettamalla kameran linssin eteen koko näkökentän peittävä tasalämpöinen kappale, jonka emissiivisyys ilmaisimen vastealueella on korkea. Tällöin jokaiselle ilmaisinelementille saapuu yhtä suuri kameran ulkopuolelta peräisin oleva signaali. Tämän tiedon avulla ohjelmisto pystyy suorittamaan tarpeelliset laskennalliset korjaukset, jotta kaikki pikselit saataisiin näyttämään samaa digitaalilukuarvoa, kuten pitäisi. NUC voidaan suorittaa joko yhdellä (yhden pisteen NUC), kahdella (kahden pisteen NUC) tai useammalla kohteen lämpötilalla. Yhden pisteen NUCin avulla kyetään korjaamaan ainoastaan ilmaisinelementtien poikkeamat mitatun radianssin kohdalla. Yhden pisteen NUCissa suoritetaan Kuvassa 25 esitetty ensimmäinen poikkeaman korjaus. Yhden pisteen NUCin etu on sen suorittamisen helppous. Sitä suoritettaessa kuvattavan tasalämpöisen kohteen radianssia ei tarvitse tuntea. Se soveltuu hyvin myös kentällä suoritettavaksi. Kahden pisteen NUCin avulla kyetään korjaamaan sekä poikkeama että herkkyys suorittamalla myös Kuvassa 25 esitetyt myöhemmät korjaukset: kulmakertoimen korjaus ja uusi poikkeaman korjaus. Kahdella eri lämpötilalla suoritettu NUC antaa luotettavampia korjauksia laajalla lämpötila-alueella. Ilmaisinelementtien lievän epälineaarisuuden takia kahden pisteen NUCilla ei kuitenkaan välttämättä päästä riittävän hyviin tuloksiin, jos mitattavan kohteen lämpötila poikkeaa merkittävästi NUCia suoritettaessa käytetyistä kohteen lämpötiloista. Tämä johtuu pienistä ilmaisinelementtien eroista, jotka aiheuttavat niiden vasteen epälineaarisuutta. Suorittamalla NUC useammalla kohteen lämpötilalla korjaukset kyetään tekemään luotettavammin vielä laajemmalla kohteen lämpötila-alueella. [34]

Vaikka ilmaisinelementtien vasteet ovat hieman epälineaariset, niin yleensä niitä mallinetaan lineaarisesti [34]. NUCin avulla $n \times m$ kokoisen ilmaisimatriisin eri ilmaisinelementtien antamat tulokset voidaan muokata keskenään vertailukelpoisiksi korjaamalla niiden herkkyyttä ja poikkeamaa seuraavan yksinkertaisen kaavan mukaisesti:

$$S_{n,m} = Vaste_{n,m} * a_{n,m} * L + Poikkeama_{n,m} + b_{n,m}, \quad (26)$$

missä $S_{n,m}$ on ilmaisinelementin (n,m) eteenpäin lähettämä signaali, $Vaste_{n,m}$ ilmaisinelementin vaste, $a_{n,m}$ vasteen korjauskerroin, L ilmaisinelementille saapuva radianssi, $Poikkeama_{n,m}$ ilmaisinelementin poikkeama ja $b_{n,m}$ poikkeaman korjaustermi. [18, s. 108 – 109] Suorien kulmakertoimet kuvaavat ilmaisinelementin herkkyyttä ja vakiotermi poikkeamaa. NUC on kvalitatiivinen kalibrointiprosessi. [18, s. 129].

Useimmissa kaupallisissa kameroissa NUC suoritetaan tehtaalla otettaessa kameraa käyttöön, minkä jälkeen se pysyy muuttumattomana ainakin siihen saakka, että kamera toimitetaan valmistajalle uudelleenkalibroitavaksi. Joissain T&K käyttöön suunnitelluissa kameroissa käyttäjä pystyy tekemään NUCin itse. Tässä työssä käytetyllä FLIR SC7600 -sarjan kameralla käyttäjä pystyy itse suorittamaan NUCin. Jotta ilmaisinelementit antaisivat luotettavia ja keskenään vertailukelpoisia tuloksia, niiden tilan tulee olla hyvin lähellä NUCin suoritushetken tilaa. Jos



Kuva 25. Ilmaisinelementtien erojen aiheuttaman virheen korjaus kolmen pikselin osalta NUCin avulla. Mukailtu lähteestä [18, s. 109]

olosuhteet ovat erilaiset, ilmaisimen vasteet muuttuvat toisiinsa nähden luultavimmin ainakin hieman. Englanniksi tästä ilmiöstä käytetään termiä *thermal drift* [18, s. 108 – 111]. Jäähdytetyissä lämpökameroissa ilmaisimen välittömän ympäristön olosuhteet pysyvät likimain muuttumattomina, mutta esimerkiksi linssin ja sen reunusten lämpötilat voivat vaihdella merkittävästi. Tarkimpiin tuloksiin päästään, kun NUC tehdään juuri ennen mittausta. Tällöin virheet ilmaisinelementtien vasteissa pystytään korjaamaan tarkimmin. NUCia suoritettaessa tulee olla tarkkaavainen. Jos pinta, jota kuvaamalla NUC suoritetaan ei säteile kaikkialta yhtä paljoa, NUCin suorittamisen jälkeen tuloksena on epävertailukelpoiset pikselit.

Ilmaisimissa on vaihtelevien valmistusvirheiden takia liki aina huonoja pikseleitä (eng. *bad pixel*), joiden herkkyys ja poikkeama eroavat muista pikseleistä niin paljon, ettei niitä kyetä korjaamaan NUCin avulla. Erittäin hyvien valmistajien ilmaisimissa huonojen pikseleiden määräksi hyväksytään usein alle 0,01 %:n osuus pikseleiden kokonaismäärästä. Tämä tarkoittaa kuitenkin esimerkiksi 640 x 512 kokoisessa ilmaisimessa 32 pikseliä. Tyypillisesti huonojen pikseleiden vaikutus pyritään korjaamaan korvaamalla niiden ulostulosignaali niitä ympäröivien pikseleiden signaalien painotetulla keskiarvolla. Ongelmia kuitenkin muodostuu, jos huonot pikselit sattuvat esiintymään vierekkäin. Tällöin niiden ilmaisema lopullinen digitaalilukuarvo voi olla hyvin virheelinen. [18, s. 113 – 114]

3.4.2 Kvantitatiivinen kalibrointi

Tässä työssä keskeisin kiinnostuksen alainen radiometrinen suure on radianssi, joka on tarkemmin määritelty luvussa 2.2. Infrapunasensoreille suoritetaan kvantitatiivinen kalibrointi, jotta sensorin antaman digitaalilukuarvon ja sensorin havaitseman signaalin voimakkuuden välille kyetään määrittämään tarkka kvantitatiivinen yhteys. Tämä mahdollistaa kvantitatiivisten radiometristen mittausten suorittamisen. Lineaaristen ilmaisimien tapauksessa digitaalilukuarvon ja radianssin riippuvuus on lineaarinen, toisin kuin esimerkiksi digitaalilukuarvon ja kohteen lämpötilan välinen

riippuvuus. Radianssin avulla kyetään päättämään muiden radiometristen suureiden, kuten irradianssin suuruuksia. Lisäksi mikäli kohteen emissiivisyys ja väliaineen vaikutus tunnetaan, radianssin perusteella voidaan määrittää myös kohteen lämpötila.

Kalibrointi suoritetaan tyypillisesti mittaamalla kontrolloitua mustan kappaleen verrokisäteilijää vähintään kahdella sen eri pintalämpötilalla. Tällaista kohdetta käytetään, koska niiden emittoiman säteilyn voimakkuus ja aallonpituusjakauma tunnetaan varsin tarkasti. Niiden emittoiman säteilyn radianssi voidaan laskea integroimalla Planckin laki kameran vastealueen yli. Näiden mittausten avulla saadaan selvitettyä yhteys sensorin antaman digitaalilukuarvon ja kuvattavan kohteen säteilemän radianssin välille. Tämä yhteys selvitetään jokaiselle pikselille, joten kalibrointi toimii myös kvantitatiivisena NUCina. Kalibroitimittausten aikana kameran koko näkökentän tulee peittyä kokonaan tunnetun lämpöisen mustan kappaleen säteilijän pinnasta. Tällöin jokaiselle sensorin pikselille saapuvan signaalin voidaan arvioida olevan identtinen ja yhteys voidaan määrittää jokaiselle pikselille. Kuvattavan pinnan tulee mielellään olla lähellä sensoria, jotta ilmakehän vaimennuksen ja emission vaikutukset olisivat mahdollisimman pieniä ja sensorin antama digitaalilukuarvo riippuisi ideaalisti ainoastaan mustan kappaleen pintalämpötilasta T_{bb} seuraavan kaavan mukaisesti:

$$DL(T_{bb}) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V_{aste\lambda} L_{\lambda}(T_{bb}) d\lambda, \quad (27)$$

missä $[\lambda_1, \lambda_2]$ on sensorin vastealue, $V_{aste\lambda}$ kameran spektraalinen vaste ja $L_{\lambda}(T_{bb})$ mustan kappaleen spektraalinen radianssi. Kameran linssiä ei kuitenkaan kannata asettaa aivan kiinni kuumaan mustan kappaleen säteilijään, sillä se voi merkittävästi lämmittää kameraa, millä voi olla vaikutusta mittaukseen.

Kalibroinnissa olisi hyvä käyttää useampaa kuin kahta mustan kappaleen verrokisäteilijän pintalämpötilaa. Tällöin kalibroitiparametrit saadaan määritettyä luotettavammin ja välttytään pitkiltä ekstrapoloinnilta mitattaessa kohteita kalibroitialueen ulkopuolelta. [35, s. 83 – 93] Kunnollisessa kalibroinnissa tulee valita integrointiaikojen ja mustan kappaleen säteilijöiden pintalämpötilojen yhdistelmät siten, että ne kattavat sensorin koko dynaamisen alueen mahdollisimman tarkasti. Tällöin mittaustuloksista saadaan mahdollisimman luotettavia riippumatta mittauksen kohteen pintalämpötilasta.

Mittattuihin datapisteisiin sovitetaan laskennallisesti suora, jonka kulmakerroin kk kuvaa kohteesta sensorille saapuvan radianssin L_k ja sensorin antaman digitaalilukuarvon DL suhdetta tietyllä integrointiajalla IT sekä poikkeama A kaikkien kohinalähteiden ja loissäteilyn yhteisvaikutusta.

$$DL = kk IT L_k + A \quad (28)$$

Tätä on havainnollistettu Kuvassa 26. Kalibroinnin kannalta keskeisin suure on kulmakerroin, sillä loissäteilyn ja kohinan vaikutusta kuvaava poikkeama vaihtelee merkittävästi olosuhteista riippuen. Kulmakerroin kk voidaan esittää seuraavan kaavan avulla.

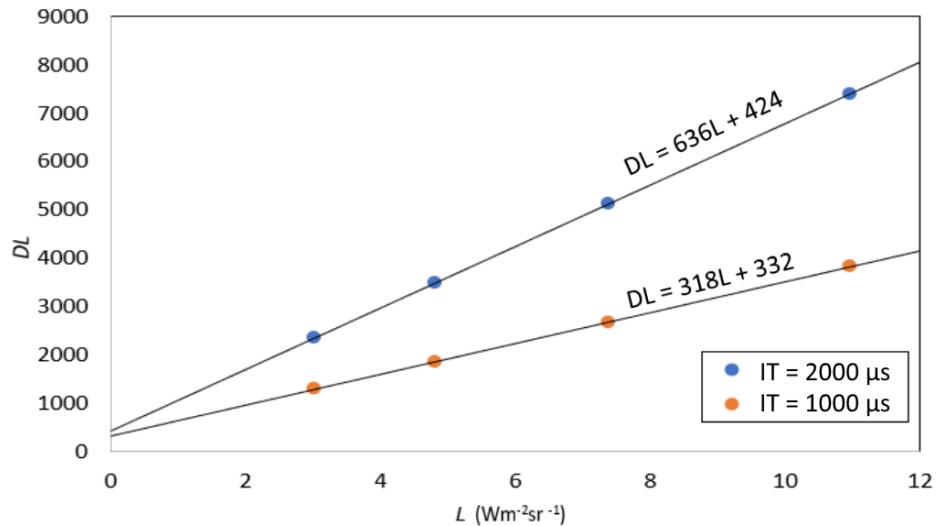
$$kk = \frac{DL}{L_k \cdot IT} \quad (29)$$

Kulmakerrointa voidaan kutsua myös kalibrointikertoimeksi. Tämän tyyppinen kalibrointi pätee lineaarisille sensoreille. Olettaen sensorin vasteen olevan lineaarinen, kalibrointisuoran avulla ekstrapoloimalla voidaan selvittää absoluuttisia herätteen arvoja myös kohteista, joiden heräte on paljon matalampi kuin kalibrointiprosessissa mitattujen kohteiden. Tosin tällöin mittaustulosten luotettavuus hieman kärsii. [36]

Sensorin vaste ja täten myös kalibroinnissa selvitettävä kulmakerroin riippuu ilmaisimen ominaisuuksien lisäksi käytetyn optiikan ja mahdollisen suotimen läpäisevyydestä sekä linssin muista ominaisuuksista. Tämä tarkoittaa, että kalibrointi tulee suorittaa erikseen jokaiselle sensorissa käytettävälle optiikalle ja suotimelle. [18, s.129 – 130] Tarkat menetelmät kalibroinnin suorittamiseen riippuvat niiden suorittajasta. Erilaisia käytäntöjä ja niiden yleisyyksiä lämpökuvauksen näkökulmasta käsitellään McEvoy'n, Simpsonin ja Machin vuonna 2012 julkaisemassa konferenssijulkaisussa [37]. Julkaisun sisältö perustuu pääosin kyselytutkimukseen, joka oli kohdennettu Euroopan merkittäville kuvantavien termometrien mittaustuki- ja kalibrointipalveluiden tarjoajille. Tutkimuksessa käsiteltiin miten palveluntarjoajat huomioivat kalibroinnissa käytettyjen erilaisten parametrien, kuten kohteen emissiivisyyden ja etäisyyden vaikutuksen huomioimista sekä suoritetaanko kalibrointiprosessissa mittauksia, joiden avulla voidaan määrittää ympäristön muutoksen vaikutusta kalibroinnin luotettavuuteen. Julkaisun perusteella palveluntarjoajien kalibrointiprosesseissa on paljon vaihtelevuutta ja useissa tapauksissa huomattavasti parannettavaa. Esimerkiksi vain pieni osa palveluntarjoajista ilmoitti arvioivansa ympäristön muutoksen vaikutusta. Näissäkin tapauksissa arviointi oli erittäin rajallista. [37]

Markkinoilta löytyy useita erityyppisiä mustan kappaleen verrokkisäteilijöitä, joita voidaan käyttää infrapunakameroiden kalibrointiin. Niiden pintalämpötila on tasainen ja hyvin tarkasti säädettävissä etenkin lämpötiloihin, jotka ovat samaa suuruusluokkaa kuin huoneen lämpötila, mutta kuitenkin ympäristöään lämpimämpiä. Lisäksi niiden emissiivisyys on korkea, tyypillisesti luokkaa 0,99. Kalibrointiprosessissa kannattaa huomioida myös mustan kappaleen säteilijän heijastama säteily, jonka suuruus riippuu ympäristön lämpötilasta ja mustan kappaleen emissiivisyydestä. Ympäristön lämpötila ja mustan kappaleen emissiivisyys kannattaa tuntea ja ottaa huomioon, jos tahdotaan suorittaa tarkkoja kalibrointimittauksia. [38] Kalibrointimittauksia suoritettaessa on huomioitava, että ympäristöään kylmemmäksi säädettyjen mustan kappaleen verrokkisäteilijöiden kanssa ongelmaksi voi muodostua veden tiivistyminen niiden pinnalle. Mikäli kalibrointiprosessissa oletetaan korkeaemissiivisen verrokkisäteilijän emissiivisyyden olevan 1 ja heijastavuuden 0, eikä ympäristöstä peräisin olevan säteilyn heijastumista sen pinnasta huomioida, voi mittaus-tarkkuus etenkin mitattaessa kylmiä kohteita laskea hyvin merkittävästi [39, s. 1003 – 1005].

Tässä työssä käytetyn FLIR SC7600 -sarjan kameran Kalibrointimittaukset suoritettiin sisätiloissa normaalissa huoneenlämmössä. Ne suoritettiin mittaamalla kolmella eri integrointiajalla mustan kappaleen verrokkisäteilijää säädettyinä kolmeen eri lämpötilaan. Kaikki käytetyt mustan kappaleen pintalämpötilat olivat selkeästi huoneenlämpöä korkeampia, esimerkiksi 30, 65 ja 100 °C. Tällöin mustan kappaleen säteilijä kykenee luotettavimmin pitämään pintansa lämpötila-jakauman tasaisena. Näillä lämpötiloilla sopivat integrointiajat ovat esim. 100, 500 ja 2000 μ s.



Kuva 26. Kalibrointisuoran muodostaminen lineaariselle ilmaisimelle neljästä erilämpöisestä mustan kappaleen säteilijästä kahdella eri integrointiajalla suoritettujen kalibrointimittausten tapauksessa. Vaaka-akselilla on sensorille kohteelta saapuva radianssi ja pystyakselilla kameran ulostulosignaali eli digitaalilukuarvo.

Mittauksia suoritettiin eri integrointiajoilla, jotta kyetään laskemaan myös digitaalilukuarvon ja integrointiajan välinen yhteys. Lisäksi jokaisessa mittauksessa mitattiin ympäristön lämpöinen verrokki. Kalibrointimittauksista saadun datan perusteella jokaiselle ilmaisinelementille/pikselille määritetään omat kalibrointikertoimet. Kameralla otetut kuvat ja videot korjataan kalibrointikertoimien avulla vasta kuvien ja videoiden ottamisen jälkeen.

3.4.3 Kalibroinnin luotettavuuden haasteet

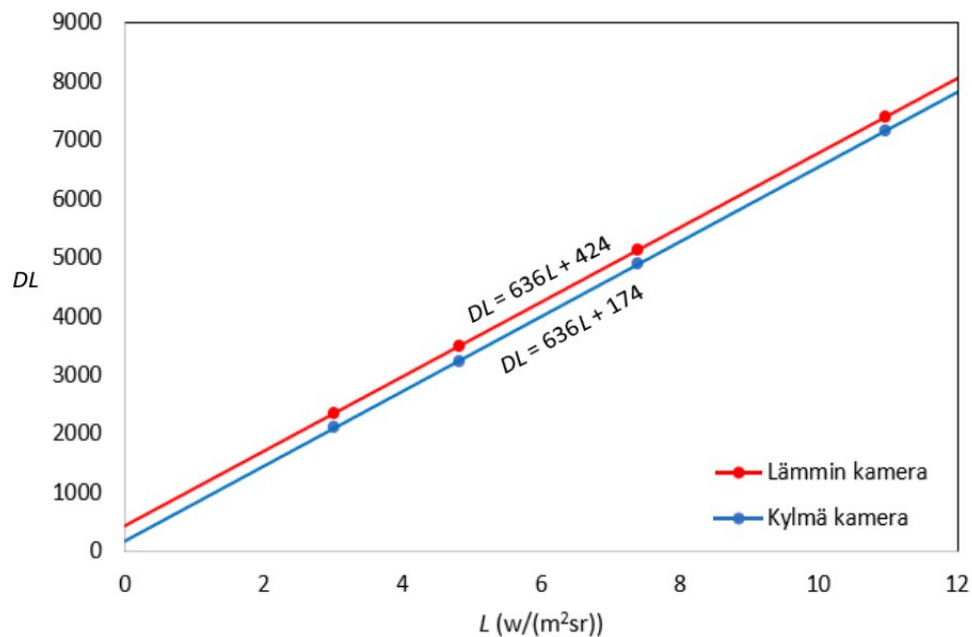
Infrapunakameroiden kalibroinnissa merkittävimpana ongelmana on se, että oikeat kalibrointiparametrit, etenkin poikkeama, muuttuvat ajan myötä, mikä johtaa kameralle saapuvan signaalin ja kameran antaman digitaalilukuarvon suhteen vääristymiseen [32, s. 1]. Parametrit muuttuvat erityisesti suorittaessa mittauksia jatkuvasti muuttuvissa kenttäolosuhteissa. [35, s. 83] Esimerkiksi kameran rungon lämpötilan muutokset aiheuttavat muutoksia kohteesta ilmaisimelle saapuneen signaalin ja kameran ilmoittaman digitaalilukuarvon suhteeseen, sillä kameran komponenttien säteilemän loissäteilyn voimakkuus muuttuu, mutta kamera ei kykene erottamaan sitä kohteesta peräisin olevasta signaalista. Käytännössä se näkyy poikkeaman muutoksena $DL(L)$ kuvaajassa, sillä loissäteilyn määrä ei riipu kuvattavan kohteen herätteen voimakkuudesta. Tätä on havainnollistettu Kuvassa 27. Jotta kalibrointiparametrit pitäisivät paikkansa, kameran ympäristön lämpötilan tulisi olla sama kuin suorittaessa kalibrointimittauksia. Lisäksi kameran tulisi olla stabiloitunut, mikä tarkoittaa, että sen ilmaisimen lämpötilan tulee olla vakio ja kameran tulee olla ympäristönsä kanssa termisessä tasapainossa. Kamera tuottaa päällä ollessaan lämpöä, ja tasapainotilan saavuttaminen voi viedä jopa tunteja. Tämä tuottaa ongelmia etenkin kenttämittauksissa, sillä olosuhteet vastaavat harvoin sisätiloja ja valmistautumisaikaa mittauksiin ei yleensä ole riittävästi.

Ympäristön lämpötilan vaikutuksia jäähdytetyillä MWIR- ja LWIR-kaistojen kameroilla suoritettuihin lämpötilamittauksiin on käsitelty Sharman et al. artikkelissa [31]. Artikkelissa esitettyjen tulosten mukaan ympäristön lämpötilan muutos (5 – 25 °C) aiheutti hyvin merkittävää mittausrvirhettä (0,5 – 4 °C) kameral ilmoittamaan kohteen lämpötilaan. Mittausvirhe oli erityisen suurta matalilla (noin 5 °C) ympäristön lämpötiloilla. Suorittamalla kalibroinnin muutetussa ympäristön lämpötilassa juuri ennen mittausta, mittausrvirhe pieneni merkittävästi erityisesti matalan ympäristön lämpötilan tapauksessa ja jokaisen mittauksen virhe oli alle 1 °C. [31]

Suuri mittausrvirhe matalassa ympäristön lämpötilassa huoneenlämmössä kalibroidulla kameralla johtui luultavammin todellisuudessa merkittävästi pienentyneestä loissäteilystä, mitä kamera ei kykene huomioimaan. Se käytännössä oletti loissäteilyn pysyneen vakiona ja laski pienemmän kokonaissignaalin johtuvan kohteen herätteen pienentymisestä. Suuri virhe lämpötilan mittauksessa johtuu myös siitä, että kappaleen emittoiman säteilyn voimakkuus kasvaa suhteessa sen neljänteen potenssiin. Esimerkiksi säteilyn radianssin pienentyminen MWIR-kaistalla $0,1 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$:lla vastaa noin 5 °C:n muutosta mustan kappaleen säteilijän lämpötilassa -20 °C:ssa ja 1 °C:n muutosta +20 °C:ssa.

Erään tavan parantaa MWIR-kaistan kameroiden kalibroinnin keston luotettavuutta esittelevät Kattnig, Thetas ja Primot artikkelissaan *Ensuring long-term stability of infrared camera absolute calibration* (Optics Express 2015) [32]. Artikkelin mukaan merkittävä kalibroinnin luotettavuutta heikentävä tekijä on ilmaisimen integrointikapasiteetin alkujännite, mutta sen vaikutus voidaan mitata ja ottaa huomioon.

Tällä hetkellä useat infrapunakameravalmistajat, kuten FLIR, vastaavat ympäristön muutosten aiheuttamiin haasteisiin absoluuttisten signaalien määrittämisessä suorittamalla kameroille käyttöönottovaiheessa hyvin laajan sarjan kalibrintimittauksia. Prosessissa kamera asetetaan



Kuva 27. Kuvitteellinen esimerkki kameral lämpötilan vaikutuksesta kalibrintisuoraan. Pisteet edustavat mitattuja kohteita. Päällekkäiset datapisteet on mitattu samoista kohteista.

olosuhdekaappiin (eng. *climate chamber*), jonka lämpötilaa ja muita parametreja kyetään kontrolloimaan tarkasti. Sääkaapissa kamera altistetaan ainakin erilaisille tunnetuille lämpötiloille, annetaan sen stabiloitua kyseiseen ympäristöön, ja suoritetaan muuten normaalin kaltaisia kalibrointimittauksia. Näin toimimalla saadaan luotua jokaiseen lämpötilaan sopivat kalibrointiparametrit, joita voidaan käyttää arvioimaan oikeita kalibrointiparametreja useissa eri olosuhteissa. Lisäksi kameralle voidaan syöttää parametreina mm. ympäristön lämpötila ja mittausetäisyys, jolloin voidaan arvioida ilmakehän vaimennuksen vaikutusta. Englanninkielinen nimitys tälle prosessille on *ambient drift compensation* [18] ja se voidaan suomentaa ympäristön vaikutuksen kompensoinniksi. Kamera voi toteuttaa sen automaattisesti käyttämällä apuna tietoa runkonsa lämpötilasta, mikäli se sitä kykenee mittaamaan. [32, s. 4]

Tässä työssä käytetty FLIR SC7600 -sarjan kamera kykenee mittaamaan runkonsa lämpötilaa. Ongelmaksi kuitenkin muodostuu tämän tyyppisen ratkaisun tarkkuus ja heikko soveltuvuus kenttäolosuhteisiin. PVTUTKL:n kenttämittauksissa on havaittu, että tahdottaessa määrittää kohteista mitatun säteilyn absoluuttisia arvoja tämän tyyppisellä ratkaisulla ei usein päästä riittävän hyvään mittaustarkkuuteen. Syitä tähän ovat muun muassa, se että mittaustilanteet tapahtuvat usein nopeasti, eikä kamera ehdi stabiloitua vallitseviin olosuhteisiin, jolloin kameralle lämpötila ei riitä arvioimaan kameralle muiden keskeisten komponenttien kuten optiikan lämpötilaa ja siten sen aiheuttaman loissäteilyn määrää. Lisäksi mm. auringonpaiste voi lämmittää kameraa toispuoleisesti, mikä sekin aiheuttaa huomattavaa virhettä tämantyyppistä ratkaisua käytettäessä.

Kameroiden kvantitatiivisen kalibroinnin epästabiilisuus johtaa siihen, että tahdottaessa suorittaa tarkkoja kvantitatiivisia mittauksia kalibrointimittaukset joudutaan mittaamaan juuri ennen mittausta. Tällöin kalibrointiparametrit kyetään määrittämään tarkasti vallitsevat olosuhteet huomioon ottaen. Tässä luvussa kuvatus kalibrointiprosessin suorittaminen kentällä voi kuitenkin olla haastavaa, koska mustan kappaleen säteilijät eivät välttämättä kestä kenttäolosuhteita, niiden kuljettaminen on työlästä, niiden pinta-ala voi olla liian pieni, niiden stabiloitumista ei välttämättä ehditä odottamaan, eikä niiden vaatimaa ulkoista voimavaroa välttämättä ole saatavilla. Lisäksi tuuli vaikuttaa niiden pintalämpötilan stabiilisuuteen heikentävästi ja alin lämpötila, johon ne voidaan stabiloida, on usein turhan korkea, jos tahdotaan luotettavasti mitata matalaherätteisiä, esimerkiksi alle -20 °C:n lämpöisiä kohteita. Tämän työn tavoite olisikin kehittää yksinkertaisempi kalibrointimenetelmä, jolla saavutetaan riittävä tarkkuus ja joka sopii paremmin kentällä suoritettavaksi. Mikäli työn tuloksena havaitaan, että yksinkertaisten kalibrointimenetelmien avulla ei kyetä määrittämään matalaherätteisten kohteiden, kuten pakkastaivaan, radianssin absoluuttisia arvoja, sekin on arvokas tulos. Siinä tapauksessa joudutaan tutkimaan vaihtoehtoisia menetelmiä riittävän tarkkojen arvojen saavuttamiseksi.

Lisäksi, jotta infrapunakameralla kyettäisiin suorittamaan tarkkoja radiometrisiä mittauksia, väliaineen vaimennus ja emissio on tunnettava varsin tarkasti, sillä ne määrittävät kohteen emittoiman ja ilmaisimelle päätyvän signaalin eron. Ne pystytään laskemaan varsin hyvällä tarkkuudella, jos ympäröivät olosuhteet tunnetaan tarkasti. Ideaalissa tilanteessa kalibrointi suorite-

taan mustilla kappaleilla samalta etäisyydeltä kuin kohdetta kuvataan.[35] Joitain varsin kenttäkelpoisia kalibroitiratkaisuja esitellään Jacobsin kirjan kuudennessa luvussa *Infrared Calibration Procedures* [35].

3.5 Infrapunakameroiden sovelluskohteita

Nykyään suurimmassa osassa infrapunakameroita on termiset ilmaisimet. Vaikka niiden herkkyys ja vasteaika ovat kertaluokkia kvantti-ilmaisimia heikompia, niiden ominaisuudet riittävät suurimpaan osaan käytännön sovelluksista. Termiset ilmaisimet ovat niin paljon kvantti-ilmaisimia edullisempia, että usein valinta osuu niihin. [18, s. 114] Lisäksi niiden etuja ovat tekninen yksinkertaisuus ja jäähdyttimen puutteesta johtuva äänettämyys sekä se, että kameran käynnistyksen jälkeen ei tarvitse odottaa useaa minuuttia ilmaisimen jäähtymistä toiminnan edellyttämälle tasolle. Kvantti-ilmaisimella varustetut kamerat ovat kuitenkin käytössä joissain vaativammissa sovelluksissa ja T&K käytössä. Nykyään termiset ilmaisimet toimivat pääasiassa LWIR-kaistalla. MWIR-kaistan kameroiden ilmaisimet ovat tyypillisesti jäähdytettyjä kvantti-ilmaisimia. [40]

Karkein jako infrapunakameroiden sovelluskohteille voidaan tehdä sotilas- ja siviilisovellusten välille. Varsin laajan skaalan siviilipuolen sovelluksia esittelevät Vollmer ja Möllmann [18]. Useita eri sotilassovelluksia puolestaan käydään lyhyesti läpi Solanteen ja Kosolan teoksessa Digitaalinen taistelukenttä [12]. Kuten yleisesti tiedetään, infrapunakameroita hyödynnetään laajasti erilaisissa valvonta- ja tähtäyssovelluksissa. Tässä luvussa käydään läpi muutamia toisen tyyppisiä infrapunakameroiden sovelluskohteita.

Eräs materiaalitekniikkaan liittyvä sovelluskohde on lämpökuvauksen käyttäminen materiaalien tuhoamattomaan testaukseen (NDT, eng. *Non-Destructive Testing*). Lämpökuvaamisen etuja ovat mm. turvallisuus, kontaktittomuus kappaleeseen, kyky havaita pinnan alaisia vikoja, kuten murtumia ja koloja, sekä kyky tarkistaa varsin laajoja pintoja nopeasti. Lämpökuvauksen hyödyntämiseen NDT:ssä liittyy kuitenkin haasteita, joita ovat mm. suurten pintojen hallittu lämmitys, kaluston suhteellisen korkea hinta sekä tietyn tyyppisten virheiden löytämisen hankaluus tai jopa mahdottomuus. Testaus lämpökuvauksella voi olla joko aktiivista, jolloin tutkittavia kappaleita lämmitetään, tai passiivista, jolloin kappaleissa on havaittavia lämpötilaeroja ilman ulkoista lämmitystä. NDT sovelluksissa hyödynnetään varsin tasaisesti sekä MWIR- että LWIR-kaistan sensoreita. Eräs suosittu NDT-sovellus on pulssitermografia (eng. *pulse thermography*). Tässä menetelmässä testattavaan kappaleeseen aiheutetaan lämpöpulssi, joka on materiaalin lämmönjohtavuudesta riippuen kestoaltaan millisekunneista sekunteihin. Lämpökameralla seurataan pulssin etenemistä materiaalissa. Poikkeamat materiaalissa vaikuttavat pulssin etenemiseen, joten ne kyetään havaitsemaan. Esimerkiksi materiaalin sisällä oleva tyhjä tila, kuten murtuma tai huokonen, hidastaa pulssin etenemistä. Tällöin lämpö kertyy sen alueelle, joka näkyy lämpökuvassa ympäristöään lämpimämpänä. Jotta pienetkin materiaalivirheet ja niiden aiheuttamat lämpötilaerot voitaisiin havaita, tulee käytettyjen infrapunakameroiden termisten resoluutioiden olla varsin hyvät. [41]

Infrapunakuvausta voidaan käyttää erilaisten kaasujen havaitsemiseen. Se perustuu kaasujen absorptioon ja emissioon tietyillä aallonpituuksilla, jotka ovat niille tunnusomaisia. Tätä ilmiötä on hieman tarkemmin käsitelty luvussa 2.4. Kaasujen havaitsemisessa hyödynnetään tyypillisesti MWIR-kaistan kameroita, joissa on vain kapeaa aallonpituuskaistaa läpäiseviä BP-kylmäsuotimia, jotka ovat ominaisia tietylle kaasulle. Ne päästävät lävitseen ainoastaan aallonpituuksia, joilla kyseinen kaasu absorboi ja emittoi säteilyä. Tällöin kontrasti kiinnostuksen kohteena olevan kaasun ja taustan välillä paranee helpottaen kaasun havaitsemista. Infrapunakuvausta voidaan hyödyntää mm. myrkkypilvien tai kaasuvuotojen paikantamiseen. Liki kaikki kaasujen havaitsemiseen liittyvät sovellukset ovat kvalitatiivisia, mutta ainakin hiilidioksidin tapauksessa on kehitetty myös kvantitatiivisia sovelluksia. [18, s. 397 – 418] Esimerkiksi FLIR Systems valmistaa useita eri infrapunakameramalleja, jotka on tarkoitettu tiettyjen kaasujen etsimiseen [42] .

Infrapunakuvausta hyödynnetään laajasti elektroniikkateollisuudessa. Eräs sovellus, jossa infrapunakuvauksesta on suurta hyötyä, on mikropiirien testaus. Sen merkitys on kasvanut teknologian edistyessä ja elektronisten komponenttien koon jatkuvasti pienentyessä. Pienissä komponenteissa matalatkin jännitteet ja virrat voivat aiheuttaa liiallista kuumenemista, joka voi johtaa komponenttien vioittumiseen. Esimerkiksi kuumenevien komponenttien sijoittaminen liian lähelle toisiaan voi aiheuttaa kuumentumisen yli kriittisen lämpötilan. Infrapunakameroilla kuumenemista voidaan arvioida tehokkaasti, mistä on suuri apu suunnittelussa ja testatessa mikropiirejä ja muita elektronisia komponentteja. [18, s. 522 - 524]

4. MENETELMIÄ ABSOLUUTTISEN SIGNAALIN MÄÄRITTÄMISEEN

Absoluuttisen herätteen määrittämiseksi tämän työn tavoitteiden mukaisesti tutkittiin kahta menetelmää. Molempien menetelmien pyrkimyksenä on signaalin nollatasoa vastaavan kalibrintisuoran vakiotermi määrittäminen. Kameran herkkyyttä kuvaavaa kalibrintikerrointa (kalibrintisuoran kulmakerrointa) näillä menetelmillä ei kyetä määrittämään, vaan sen oletetaan pysyvän muuttumattomana olosuhteista riippumatta. Jos myös kulmakerroin jouduttaisiin määrittämään, pitäisi juuri ennen kohteen mittaamista suorittaa kalibrintimittaukset vähintään kahdesta tunnetusta verrokkikohteesta, mikä lisäisi käytännön haasteita huomattavasti. Tässä työssä ensisijaisena tarkoituksena oli kuitenkin kehittää verrattaen yksinkertainen menetelmä, jonka avulla kyettäisiin suorittamaan absoluuttisia mittauksia riittävällä tarkkuudella.

Ensimmäisen menetelmän perusajatuksena on mitata mahdollisimman matalaherätteistä verrokkia. Verrokin on siis käytännössä oltava erittäin kylmä, sillä kappaleen emittoiman säteilyn voimakkuus riippuu sen lämpötilasta. Tätä verrokkia mittaamalla voitaisiin suoraan määrittää signaalin nollataso. Nollataso vastaa siis tilannetta, jolloin kameran ilmaisimelle ei päädy ollenkaan säteilyä kohteesta tai väliaineesta. Tällöin kameran signaali koostuu ainoastaan pimeävirrasta, lukukohinasta ja loissäteilystä, jotka määrittävät nollatason. Kalibrintisuoran vakiotermi (tai poikkeama) vastaa nollatasoa kalibrintimittausten suoritushetkellä.

Toinen menetelmä on mitata edelliseen menetelmään verrattuna korkeaherätteistä verrokkisäteilijää tai verrokkisäteilijöitä, joiden emittoiman säteilyn voimakkuus ja aallonpituusjakauma tunnetaan mahdollisimman tarkasti. Mittauksesta saatua tietoa voidaan hyödyntää nollatason selvittämiseen. Tässä luvussa esitellään tarkemmin näitä kahta menetelmää.

4.1 Kovera metallipinnoitettu peili

Ensimmäisessä tarkastellussa menetelmässä samassa mittauksessa kohteen kanssa mitataan verrokkia, jonka heräte MWIR-kaistalla on hyvin matala. Hyvin matalaherätteistä verrokkia mittaamalla kyetään määrittämään kameran kohinan ja loissäteilyn aiheuttama ulostulosignaalin osuus eli nollataso, joka on myös kalibrintisuoran leikkauspiste nollaherätteellä. Kun verrokkia mitataan juuri ennen kiinnostuksen kohteena olevaa kohdetta, kohinan ja loissäteilyn määrien voidaan olettaa pysyvän muuttumattomina.

Kuvassa 28 on havainnollistettu, kuinka tätä menetelmää voidaan hyödyntää kohteen emittoiman radianssin absoluuttisen arvon määrittämiseen. Tässä esimerkissä esitetyt arvot eivät perustu mittaustuloksiin, mutta niiden suuruusluokka on oikea. Kuvassa 28 a on esitetty tilanne, jossa matalassa ympäristön lämpötilassa kohteesta suoritetusta mittauksesta on määritetty digitaalilukuarvoksi 2400. Kameran huoneenlämmössä luvussa 3.4.2 esitetyn kalibrintiprosessin mukaisesti määritetty kalibrintisuora on

$$DL = 700L + 650, \quad (30)$$

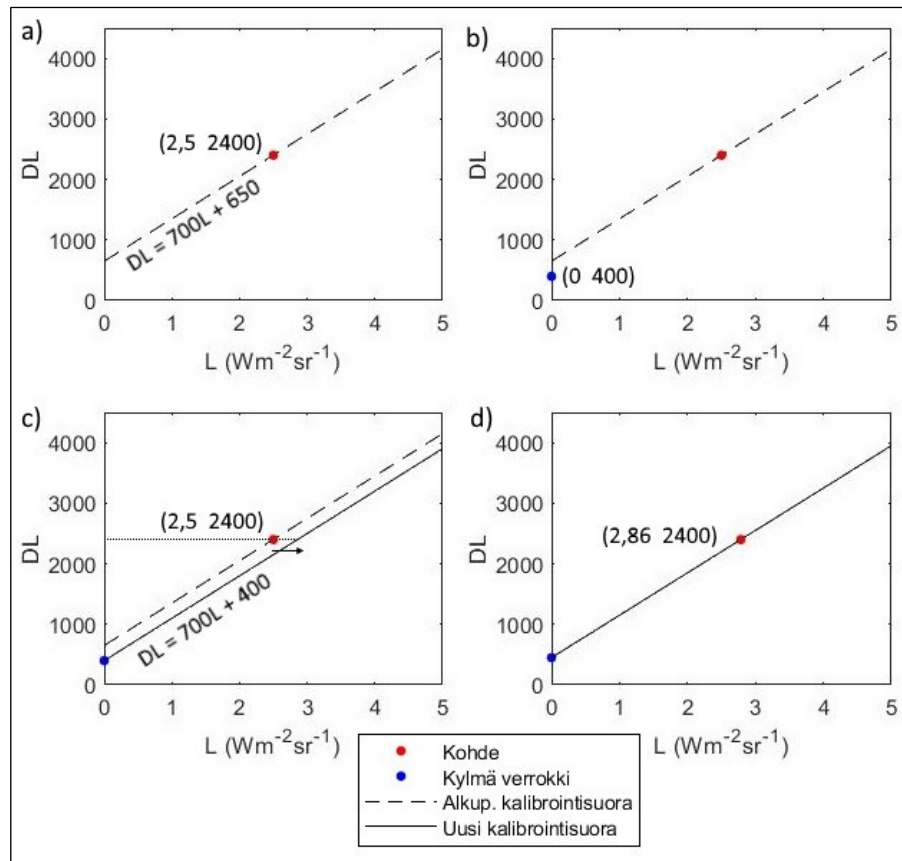
missä 700 on suoran kulmakerroin (kalibrintikerroin), jonka voidaan arvioida pysyvän vakiona ja 650 poikkeama, joka kuvaa nollatasoa ja riippuu merkittävästi mittaolosuhteista. Tämän kalibrintisuoran avulla laskettuna kohteen radianssin arvoksi saadaan $2,5 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$, joka vastaa noin $17,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpöisen mustan kappaleen aallonpituuskaistalla $2,3 - 5,5 \text{ }\mu\text{m}$ emittoimaa radianssia. Kuvassa 28 b on esitetty tilanne, jossa kylmästä verrokkikohteesta on mitattu digitaalilukuarvo 400. Tämä arvo sisältää sekä kaiken kohinan ja loissäteilyn osan signaalista että verrokkikohteesta peräisin olevan signaalin osan, jonka suuruus parhaassa tapauksessa on hyvin lähellä nollaa. Tässä menetelmässä tätä digitaalilukuarvoa käytetään nollatasona, joten sille määritetään vaaka-akselilla olevan kohteen radianssin arvoksi $0 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$. Huomion arvoista on, että kalibrintisuoran poikkeama on suurempi kuin verrokista mitattu digitaalilukuarvo. Tämä johtuu pääasiassa siitä, että loissäteilyn määrä on vähentynyt verrattuna alkuperäisiin kalibrintimittauksiin. Tässä menetelmässä määritetään uusi kalibrintisuora, jonka poikkeamaksi määritetään kylmästä verrokkikohteesta mitattu digitaalilukuarvo. Uusi kalibrintisuora on siis

$$DL = 700L + 400. \quad (31)$$

Suoran kulmakerroin pysyy entisellään, sillä sen arvo ei oletettavasti muutu merkittävästi eikä sitä yhden datapisteen avulla kyettäisi muokkaamaan tulokseksikaasti. Sekä alkuperäinen että uusi kalibrintisuora näkyvät Kuvassa 28 c. Määritettäessä kohteen radianssi uuden kalibrintisuoran avulla, sen arvoksi saadaan $2,86 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$, kuten on esitetty Kuvassa 28 d. Se vastaa noin $21 \text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpöisen mustan kappaleen emittoimaa radianssia. Ero eri kalibrintisuorien avulla määritetyissä kohteen radiansseissa johtuu käytännössä siitä, että alkuperäistä kalibrintisuoraa käytettäessä kamera ”oletti” loissäteilyn säilyneen ennallaan.

Koska kohteen emittoiman säteilyn voimakkuus riippuu sen lämpötilasta Planckin lain mukaisesti, on verrokkikohteen oltava hyvin kylmä, jotta nollataso saataisiin määritettyä riittävällä tarkkuudella. Verrokkikohteen hyväksyttävä lämpötila riippuu vaaditusta tarkkuudesta, jolla kohteista mitattujen signaalien absoluuttinen voimakkuus tulee kyetä määrittämään. Esimerkiksi tahdottaessa $0,1 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ tarkkuus MWIR-kaistalla, mitattavan verrokin pintalämpötilan tulisi olla selkeästi alle $-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Kylmien kohteiden mittaamiseen etenkin kenttäolosuhteissa liittyy kuitenkin haasteita. Ympäristöään paljon kylmemmän kappaleen pintaan kondensoituu nestemäistä vettä tai huurretta, mikä aiheuttaa virhettä mittaukseen. Etenkin kenttäolosuhteissa tähän käyttötarkoitukseen riittävän kylmien kappaleiden pinnan huurtuminen on käytännössä väistämätöntä. Lisäksi, jos verrokkikohteen emissiivisyys on alle 100 %, se myös heijastaa (diffuusisti) ympäristöstään peräisin olevaa säteilyä, mikä kasvattaa sen pinnan herätettä. Mahdollinen ratkaisu tähän ongelmaan on hyödyntää säteilyn heijastumista. Jäähdytetyn infrapunakameran ilmaisimien on erittäin kylmä, tyypillisesti noin $77 \text{ K} / -196 \text{ }^{\circ}\text{C}$, joten sen MWIR-kaistalla emittoima radianssi on erittäin matala, käytännössä olematon. Jos kameran eteen asetetaan peilimäinen pinta, kamera näkee siitä oman heijastuksensa, mukaan lukien ilmaisimensa heijastuksen. Tällöin kylmän ilmaisimen heijastusta voidaan käyttää verrokkina. Peilimäisen pinnan heijastavuus on korkea, joten sen



Kuva 28. Havainnollistava esimerkki siitä, kuinka erittäin matalaherätteisestä verrokista mitattua signaalia voidaan hyödyntää kohteen radianssin todellisen absoluuttisen arvon määrittämiseen, kun mittausolosuhteet poikkeavat alkuperäisen kalibroinnin olosuhteista. Kylmästä verrokista mitatun signaalin avulla kalibrointisuoran poikkeama/vakiotermi voidaan korjata lähemmäs todellista nollatasoa.

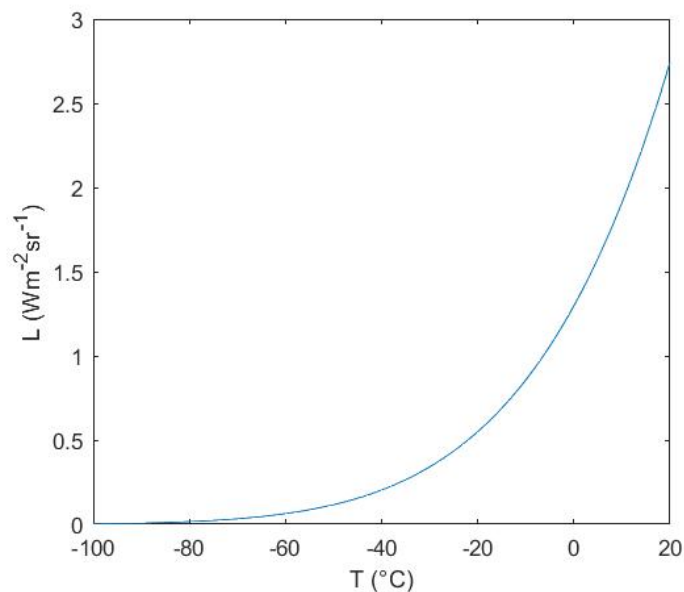
emissiivisyys on matala, kuten myös sen herätekin. Lämmintäkin peiliä voidaan siis käyttää kylmän kappaleen korvikkeena, kun siitä heijastetaan kylmästä kappaleesta peräisin oleva signaali. Tämä tarkoittaa myös, että peili voi olla ympäristönsä lämpöinen, jolloin sen pinnalle ei tiivisty vettä tai huurua. Myöskään peilin jäähdyttämistä ei tarvitse huolehtia

Huomion arvoista on, että normaali peili, jossa päällimmäinen kerros on lasia, ei toimi tässä sovelluksessa, sillä infrapunasäteily ei läpäise normaalia lasia. Sen sijaan voidaan käyttää peiliä, jonka pinta on metallia, sillä kiillotetun metallipinnan heijastavuus infrapuna-alueella on korkea. Yleisesti saatavilla on mm. alumiini-, hopea- ja kultapinnoitettuja peilejä.

Mitattaessa peilin kautta kameran omaa ilmaisinta, ilmaisimelle saapuva signaali koostuu periaatteessa samoista komponenteista kuin mitattaessa normaalia kohdetta tai taustaa. Käytännön kannalta signaalin koostumus on kuitenkin erilainen. Ensinnäkin, koska tavoitteena tässä menetelmässä on mitata mahdollisimman pieni signaali, peili tulee asettaa mahdollisimman lähelle kameraa, jotta ilman emission vaikutus voidaan minimoida. Toisin kuin liki kaikkien kohteiden tapauksessa, peilin heijastavuus on erittäin korkea ja emissiivisyys matala. Peili siis emittoi itse hyvin vähän säteilyä ja heijastaa ilmaisimelle säteilyä, joka on peräisin kameran näkökentästä. Kameran ilmaisimen lämpötila on äärimmäisen matala, joten sen emittoiman säteilyn

määrä on häviävän pieni ja se voidaan jättää huomioimatta. Ilmaisimen emittoiman säteilyn lisäksi peili heijastaa takaisin ilmaisimelle myös loissäteilyä, joka on peräisin kameran komponenteista. Lisäksi esimerkiksi kameran rungosta voi päätyä säteilyä kameran sisälle siten, että osa siitä heijastuu kameran komponenteista ilmaisimelle. Mitattaessa peiliä, loissäteilyn osuus signaalista on siis suurempi verrattuna kohteen mittaamiseen. Se, kuinka paljon loissäteilyn määrä kasvaa kuvattaessa peiliä, tulee selvittää kokeellisesti. Valistunut oletus on, että loissäteilyn määrä korkeintaan kaksinkertaistuu. Loissäteilyn osuuden kasvaminen peiliä mitattaessa on ongelmallista, sillä se aiheuttaa virhettä signaalin nollatason määrittämiseen.

Peilin kautta jäähdytettyä ilmaisina mittaamalla todella voidaan saada mitattua varsin alhaisia radianssin arvoja. Esimerkiksi Vollmerin teoksessa MWIR-kaistan jäähdytetyllä lämpökameralla mitattiin huoneenlämpöisestä kiillotetusta metallipinnasta heijastuneen kameran oman ilmaisimen lämpötilaksi -60 °C [18, s. 125]. Tässä tapauksessa mittaus ei liittynyt kalibrointiprosessiin. Kuvassa 29 on esitetty mustan kappaleen säteilijän FLIR SC7600 -sarjan infrapunakameran ilmaisimen vastealueella $2,3 - 5,5\text{ }\mu\text{m}$ emittoiman säteilyn radianssi. Radianssi on laskettu integroimalla Planckin laki kyseisen aallonpituusalueen yli. Kuten kuvasta nähdään, radianssi pienenee eksponentiaalisesti mustan kappaleen pintalämpötilan laskiessa. Muutamia kyseisen aallonpituuskaistan radiansseja on esitetty Taulukossa 7. Esimerkiksi -60 °C :n lämpöisen kappaleen emittoiman säteilyn radianssi on $0,0639\text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$, joka on vain noin 2 % 20 °C :n lämpöisen kappaleen radianssista ja 12 % -20 °C :n lämpöisen kappaleen radianssista. Tämä tarkoittaa, että käytettäessä Vollmerin kirjassa esitetyssä tapauksessa peilistä mitattua radianssin arvoa ($0,0639\text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$) nollatasona absoluuttisia mittauksia suoritettaessa, epätarkkuus radianssin määrittämisessä olisi edellä mainittujen prosenttiosuuksien suuruusluokkaa kuvattaessa samassa ympäristössä 20 tai -20 °C :n lämpöisiä kohteita. Lämpötilan muutokseksi muutettuna tämä vastaa noin $0,66$ ja $2,45\text{ °C}$:n suuruisia virheitä.



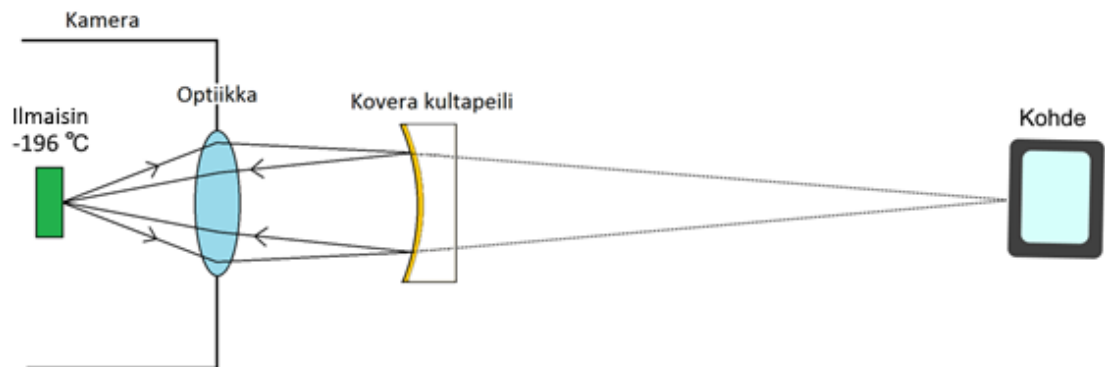
Kuva 29. Mustan kappaleen säteilijän aallonpituusalueella $2,3 - 5,5\text{ }\mu\text{m}$ säteilemä radianssi.

Taulukko 7. Mustan kappaleen säteilijän emittoiman säteilyn radianseja aallonpituusalueella $2,3 - 5,5 \mu\text{m}$.

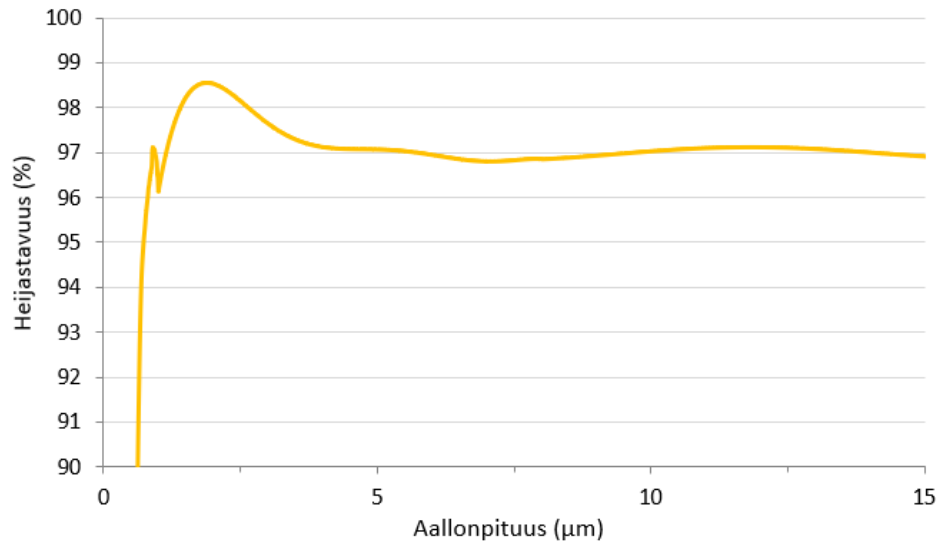
Mustan kappaleen pinta- lämpötila ($^{\circ}\text{C}$)	Radianssi ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$)	1 $^{\circ}\text{C}$:n lämpiämisen aiheuttama muutos radianssissa ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$)
20	2,76	0,097
0	1,31	0,048
-20	0,554	0,026
-60	0,0639	0,0041
-100	0,00290	0,0013
-196	$7,89 \cdot 10^{-12}$	$4,5 \cdot 10^{-12}$

Tasomaisen peilin kanssa ongelmaksi muodostuu se, että mitattaessa kauempana olevaa kohdetta ja kameran ollessa fokusoituna kyseiselle matkalle, peilin tulisi sijaita noin puolivälissä kohteen ja kameran välissä. Tämä tuottaisi mittavia käytännön haasteita. Lisäksi kameran ja peilin välissä olevan ilman emissio aiheuttaisi kasvattaisi mitattua signaalia hyvin merkittävästi. Vaihtoehtona olisi siirtää peili kameran lähelle ja muuttaa kameran tarkennusta, mutta myös se aiheuttaa käytännön ongelmia mittauksissa. Koverien peilien käyttö ratkaisee tämän ongelman, sillä sopivan kaarevuuden omaava kovera peili on kameran fokuksessa lähempänä kameran linssiä kuin tasomainen peili. Lisäksi kovera peili suurentaa ilmaisimen kuvan, mistä on myös hyötyä, sillä tällöin useampi ilmaisimen pikseli kuvaa matalaherätteistä kohdetta. Kuvassa 30 on havainnollistettu koveran peilin toimintaperiaatetta.

Peilin halkaisijan tulisi olla loissäteilyn vaikutuksen minimoiseksi mieluiten merkittävästi linssin halkaisijaa (50 mm) suurempi. Riittävän suuria koveria metallipinnoitettuja peilejä oli kuitenkin saatavilla varsin rajallisesti. Tässä työssä päädyttiin käyttämään halkaisijaltaan 75 mm leveitä suojattuja kultapinnoitettuja peilejä (Thorlabsin tuotenumero CM750-150-M01). Kultapinnan päällä on suojaava SiO_2 kalvo. Peilejä hankittiin neljällä eri polttovälillä: 75, 150, 200 ja 500 mm. Peilien heijastavuus MWIR- ja LWIR-kaistoilla on korkea, noin 97 %. Valmistajan ilmoittama peilien heijastavuus on esitetty Kuvassa 31. Jatkossa tässä työssä puhuttaessa peilistä tai kultapeilistä, viitataan näihin Thorlabsilta hankittuihin koveriin kultapinnoitettuihin peileihin.



Kuva 30. Havainnollistus koveran kultapinnoitetun peilin toimintaperiaatteesta.



Kuva 31. Valmistajan ilmoittama koveran kultapinnoitetun peilin heijastavuus. MWIR-kaistalla heijastavuus on 97 – 98 %. [43]

Peilin käyttämiseen nollatason selvittämisessä liittyy kuitenkin haasteita. Peili heijastaa ilmaisimelle sen itsensä emittoiman säteilyn lisäksi myös muiden kameran komponenttien säteilyä. Esimerkiksi osa linssin ja tyhjiön ikkunan kameran ulkopuolelle emittoimasta säteilystä heijastuu peilin kautta linssin läpi ilmaisimelle. Voidaan siis todeta, että peiliä mitattaessa loissäteilyn vaikutus vahvistuu. Lisäksi peili itse emittoi säteilyä, sillä sen heijastavuus on alle 100 % ja läpi-kuultamattomalle pinnalle pätee $\varepsilon = 1 - r$. Kultapeilin heijastavuus MWIR-kaistalla on 97 – 98 %, joten sen emissiivisyys on 2 – 3 % ja sen emittoiman säteilyn radianssi riippuu sen pintalämpötilasta.

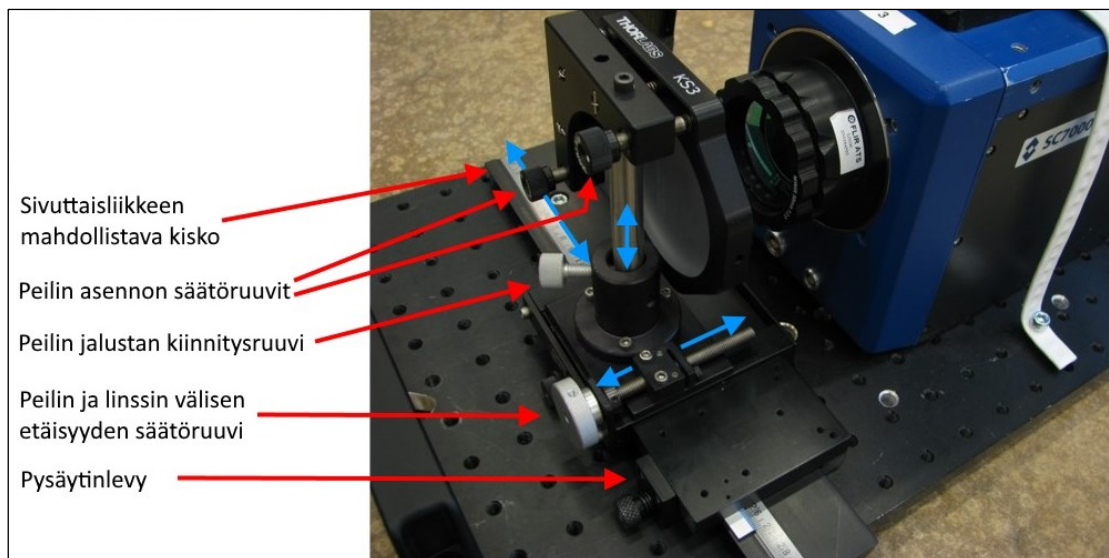
Näiden syiden takia kovera kultapeili ei välttämättä sovellu nollatason selvittämiseen riittävällä tarkkuudella ainakaan kaikissa tilanteissa. Parhaat edellytykset kohteiden radianssin absoluuttisten arvojen riittävän tarkkaan määrittämiseen ovat tilanteessa, jossa kylmällä kameralla kylmän peilin avulla mitataan korkeaherätteisiä kohteita. Tällöin loissäteilyn voimakkuus on pienintä ja mittausvirhe voi olla liki merkityksetön. Heikoimmat edellytykset taas ovat tilanteessa, jossa kuumalla kameralla kuuman peilin avulla mitataan matalaherätteistä kohdetta, kuten pakastaivasta. Tällöin loissäteilyn ja peilin emission voimakkuudet ovat suurimmillaan ja niiden voimakkuudet voivat olla jopa suurempia kuin kohteesta peräisin olevan säteilyn voimakkuus. Tällöin mittausvirhe voi olla hyvin suuri. Työn kokeellisessa osuudessa on tarkemmin selvitetty kameran lämpötilan vaikutusta loissäteilyn voimakkuuteen.

Koveria peilejä kuvattaessa huomattiin, että mitä suurempi peilin polttoväli oli, sitä kauempana kamerasta sen piti olla, jotta siitä saatiin tarkka kuva. Mikäli peilin kautta kuvattu kuva ei ollut tarkka, ilmaisimelta mitatut arvot olivat korkeampia kuin tarkalla kuvalla. Eri polttovälin peileistä polttovälin 150 mm peili oli käyttökelpoinen. Kun kamera oli tarkennettu tyypillisille mitausetäisyyksille aina parista metristä äärettömyyteen, kyseisellä peilillä saatiin tarkka kuva kameran sisäosista, kun peili oli 1 – 5 cm etäisyydellä kameran linssistä. Voidaan siis todeta, että

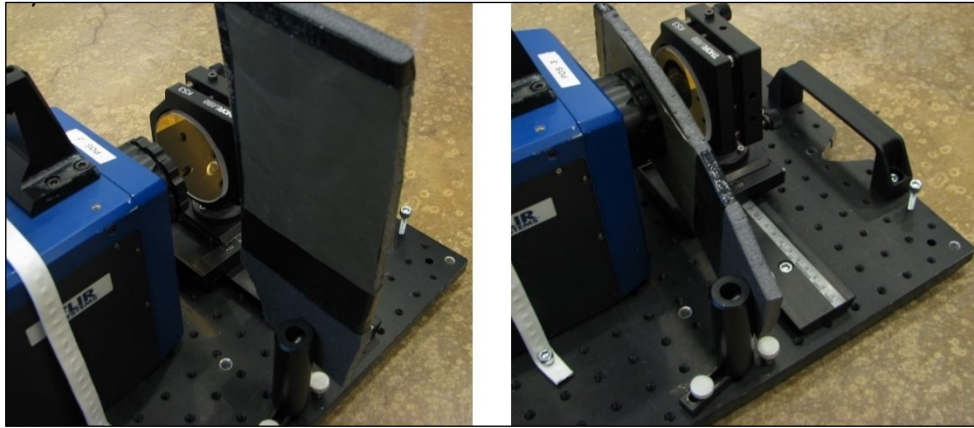
150 mm polttovälin peili oli optimaalinen työssä käytetyn kameran ja optiikan (50 mm) yhdistelmän kanssa käytettynä. Kameran kanssa kokeillun halkaisijaltaan 100 mm pidemmän polttovälin optiikan kanssa parhaiten käytettäväksi soveltui 500 mm polttovälin peili. Ilman optiikkaa tarkka kuva saatiin 75 mm polttovälin peilistä, joka oli noin 12 cm etäisyydellä kameran rungosta.

Koska peili on fokuksessa vain tietyllä etäisyydellä linssistä silloin, kun kameran tarkennusta ei muuteta, peilin ja linssin välisen etäisyyden tulee olla säädettävissä. Lisäksi peilin asento linssin eteen on suoritettava varsin tarkasti, jotta ilmaisin näkyisi peilin kautta kunnolla. Peili kiinnitettiin sitä varten suunniteltuun telineeseen, jonka avulla peilin asentoa pystyttiin säätämään tarkasti. Kamera kiinnitettiin alumiiniseen optiikkalevyyn ja peili sen eteen jalustalle, jota voitiin liikuttaa sivusuunnassa kiskon päällä. Kiskon avulla peili oli nopea siirtää kameran eteen ja pois edestä. Siirtämiseen kului aikaa noin 1 sekunti. Pysäytinlevyä hyödyntämällä peili saadaan nopeasti asemoitua oikeaan kohtaan suoraan linssin eteen. Jalustassa oli säätöruuvi, jolla peilin etäisyys linssistä voitiin tarkasti säätää sopivaksi. Säätövaraa oli noin 3 cm, joka riitti suurimpaan osaan mittauksista. Lisäksi peilin korkeussäätö oli mahdollista ja peilin etäisyys kameran linssistä oli portaattomasti säädettävissä jalustassa olevan säätöruuvien avulla. Myös peilin vaihtaminen toiseen onnistui nopeasti ja vaivattomasti reilussa minuutissa. Kuvassa 32 on esitetty peilin paikan ja asennon säätämiseen liittyvät komponentit.

Peilin ja kameran lisäksi optiikkalevyyn kiinnitettiin korkeaemissiivisellä teipillä päällystetty solumuovin pala, jonka tarkoitus oli toimia linssin näkökentän peittävänä tasalämpöisenä pintana, jota tarvitaan suoritettaessa yhden pisteen NUCia. Solumuovi oli kiinnitetty yhdestä pisteestä pylvääseen, jolloin se oli helppo ja nopea kääntää kameran linssin eteen. Tätä on demonstroitu Kuvassa 33. Solumuovia käännettäessä on huomioitava, ettei sitä tule koskea lähelle kohtaa, joka asettuu kameran linssin eteen. Muuten solumuovi lämpiää paikallisesti, mikä johtaa virheelliseen NUC-korjaukseen (luku 3.4.1).



Kuva 32. Peilin asennon ja paikan säätämiseen liittyvät komponentit. Siniset nuolet kuvaavat liikesuuntia.



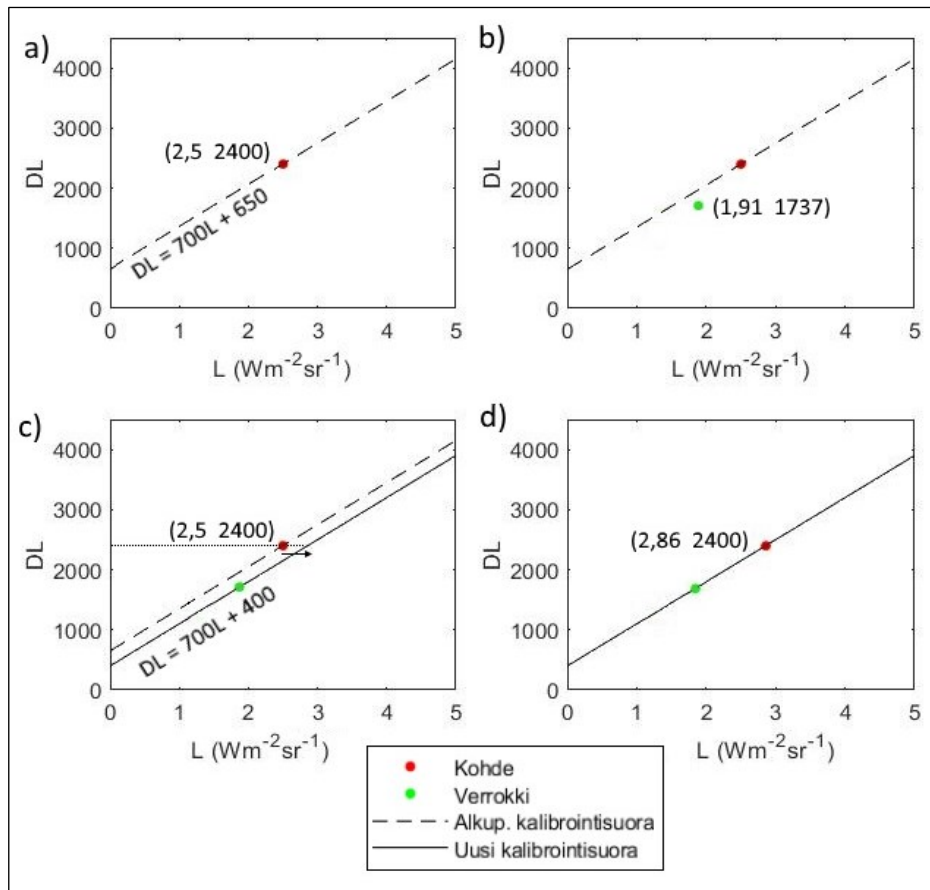
Kuva 33. NUCin suorittamiseen tarvittava korkeaemissiivisellä teipillä päällystetty solumuovi on nopea kääntää linssin eteen.

4.2 Verrokkisäteilijä

Toinen menetelmä, jonka sopivuutta absoluuttisten MWIR-kaistan mittausten suorittamiseen tässä työssä tarkastellaan, on mitata ennen varsinaista mittausta verrokkisäteilijää, jonka emittoiman säteilyn voimakkuus ja aallonpituusjakauma tunnetaan mahdollisimman tarkasti. Suorittamalla kalibrintimittaus kyseisestä verrokista, kyetään selvittämään digitaalilukuarvon ja radianssin tarkka suhde yhdessä datapisteessä. Tämän tiedon avulla kalibrintisuora kyetään sitomaan koordinaatistoon ja laskemaan sen vakiotermin suuruus. Tässä menetelmässä verrokkisäteilijän ei tarvitse olla ympäristöään kylmempi, vaan riittää, että sen pintalämpötila ja emissiivisyys tunnetaan. Parhaassa tapauksessa verrokkisäteilijän heräte on kuitenkin mahdollisimman lähellä kohteen herätettä, jolloin vältetään pitkiltä ekstrapoloinneilta. Verrokin emissiivisyyden tulee olla mahdollisimman korkea, jolloin pinnasta heijastuneen säteilyn osuus signaalista on mahdollisimman pieni ja sen vaikutus olisi vähäinen.

Tämä menetelmä on periaatteeltaan varsin samankaltainen kuin luvussa 4.1 esitetty menetelmä, jossa signaalin nollataso määritettiin suoraan mittaamalla koverasta kultapeilistä heijastunut jäähdetytyn ilmaisimen oma signaali. Kuvassa 34 on havainnollistettu, kuinka verrokkisäteilijää mittaamalla voidaan selvittää nollataso. Yhteneväisyydet Kuvassa 28 esitettyyn toiseen menetelmään ovat ilmeisiä. Tässä tapauksessa verrokkisäteilijästä mitattua datapistettä käytetään selvittämään nollataso sovittamalla kalibrintisuora kulkemaan pisteen kautta.

Merkittävä haaste tämän menetelmän hyödyntämisessä on verrokkisäteilijältä kameran ilmaisimelle saapuvan säteilyn radianssin suuruuden määrittäminen tarkasti oikein. Kuten luvussa 3.3.1 on kerrottu, ilmakehä vuorovaikuttaa säteilyn kanssa. Ilmakehän absorption ja emission vaikutukset verrokkikohteen emittoiman säteilyn radianssiin aiheuttavat epävarmuutta sen paikansa pitävyyteen. Suhteellisen pienetkin virheet ilmakehän ominaisuuksien arvioimisissa voivat merkittävästi vaikuttaa mittaustuloksiin. Parhaisiin tuloksiin todennäköisesti päästään, jos mitattava verrokkikohde on ympäristönsä lämpöinen. Tällöin ilmakehän nettovaikutus verrokkikohteen säteilyn voimakkuuteen olisi hyvin pieni ja sen radianssi kyettäisiin määrittämään tarkimmin. Li-



Kuva 34. Havainnollistava esimerkki siitä, kuinka tunnetusta verrokista mitattua signaalia voidaan hyödyntää kohteen todellisen radianssin määrittämiseen, kun mittausolosuhteet poikkeavat alkuperäisen kalibroinnin olosuhteista. Verrokista mitatun signaalin avulla kalibrointisuoran poikkeama/vakiotermi voidaan korjata lähemmäs todellista nollatasoa. Vertaa Kuvaan 28. a) Alkuperäisen kalibrointisuoran avulla kohteesta määritetty datapiste. b) Verrokista määritetty tunnettu datapiste. c) Uusi kalibrointisuora määritetään korjaamalla nollataso tunnetun datapisteen avulla. d) Kohteen radianssi on määritetty uuden kalibrointisuoran avulla.

säksi tällöin verrokkisäteilijän pinnasta heijastuva säteily vaikuttaa vähiten verrokin pinnasta lähtevän säteilyn voimakkuuteen. On kuitenkin huomioitava, että verrokkikohteen pinta voi olla haastavaa stabiloida ympäristön lämpötilaan, sillä tuuli ja auringonpaiste hankaloittavat tätä tehtävää. Stabilointi ympäristön lämpötilaa korkeampaan lämpötilaan on tyypillisesti helpompaa toteuttaa.

Joissain tilanteissa toimiva tapa on asettaa verrokkikohte kohteen kanssa samalle etäisyydelle kamerasta, jolloin ilmakehän vaikutus molempiin olisi yhtä suuri. Tällöin nollatasoa ei suoranaisesti kyettäisi selvittämään, mutta kohteesta mitattu radianssi voitaisiin määrittää varsin tarkasti vertaamalla sitä verrokin radianssiin. Tätä tapaa ei luonnollisesti voida hyödyntää määrittäessä taivaan absoluuttista signaalia. Lisäksi useissa muissakin PVTUTKL:n kenttämittauksissa tunnetun verrokin asettaminen kohteen kanssa samalle etäisyydelle kamerasta ei ole mahdollista.

Jotta tämä menetelmä olisi edellisessä luvussa esiteltyä menetelmää käyttökelpoisempi, verrokkisäteilijän todellinen radianssi tulisi kyetä määrittämään siten, että virhettä on vähemmän

kuin mikä on koveran kultapeilin avulla määritetyn nollatason tarkkuus. Huomion arvoista on, että toisin kuin koveran kultapeilin tapauksessa, tässä menetelmässä loissäteilyn merkitys ei korostu, vaan kameralle saapuvan signaalin komponentit ovat kaavan 23 mukaiset. Lisäksi mahdolliset pienet muutokset kameran herkkyydessä vaikuttavat verrattain lämmintä kohdetta mitatessa vähemmän, sillä datapiste, jonka avulla kalibroitisuuden uusi vakio-termi määritetään, on lähempänä kohteesta mitattua datapistettä. Tällöin pieni muutos kameran herkkyydessä vaikuttaa vähemmän, kuin jos verrokkikohteesta mitattu datapiste on radianssin suhteen kauempana. Joitain tässä luvussa esitellyn menetelmän tyyppisiä kalibroitiratkaisuja esitellään Jacobsin kirjan kuu-dennessa luvussa *Infrared Calibration Procedures* [35].

5. MITTAUSTEN SUORITTAMINEN JA MITTAUSTULOKSET

Kykyä määrittää radianssin absoluuttisia arvoja MWIR-kaistalla edellisessä luvussa esitettyjen menetelmien avulla tutkittiin suorittamalla laajasti erityyppisiä radiometrisiä mittauksia. Tavoitteena oli erityisesti selvittää koveran kultapeilin soveltuvuus nollatason määrittämiseen, joten kokeellisessa vaiheessa keskityttiin kyseisen menetelmän toimivuuden selvittämiseen. Mittauksia suoritettiin sekä hallituissa olosuhteissa sisätiloissa että kenttäolosuhteissa ulkona. Mittauksissa hyödynnettiin PVTUTKL:n pakkahuonetta. Se tarjosi hyvän mahdollisuuden suorittaa mittauksia hallituissa kylmissä olosuhteissa. Työn päätavoitteen saavuttamiseen, eli absoluuttisen signaalin määrittämiseen, liittyvien mittausten lisäksi suoritettiin varsin laajasti erilaisia mittauksia, joiden tarkoituksena oli selvittää työssä käytetyn FLIR SC7600 -sarjan infrapunakameran toiminnallisia ominaisuuksia entistä tarkemmin. Kun kameran toiminnalliset ominaisuudet saadaan tarkemmin määritettyä, PVTUTKL kykenee jatkossa suorittamaan luotettavampia mittauksia kameran suorituskyvyn asettamissa rajoissa. Tässä luvussa kerrotaan mittausten suorittamisesta ja esitetään niiden tuloksia sekä joitain tulosten perusteella tehtyjä johtopäätöksiä.

Ellei erikseen ole mainittu, mittauksissa on käytetty integrointiaikaa 2000 μ s. Tällä integrointiajalla kameran dynaamista aluetta kyettiin hyödyntämään hyvin. Digitaalilukuarvot on määritetty Altair-nimisellä infrapunakameran ohjaus- ja tallennusohjelmistolla noin kuvan keskeltä 30 x 30 pikselin kokoisen alueelta kymmenen kuvan keskiarvona. Saman mittauksen eri kohteiden tapauksessa pikselit olivat täsmälleen samat. Laskennalliset radianssit on määritetty PVTUTKL:lla kirjoitetulla MATLAB-funktiolla, joka laskee Planckin lain mukaisesti mustan kappaleen radianssin valmistajan ilmoittaman kameran vasteen mukaisesti sekä huomioi ilmakehän vaimennuksen ja emission ohjelmalle syötettyjen ympäristön lämpötilan ja ilmankosteuden perusteella. Hiilidioksidin pitoisuutena käytettiin aina pitoisuutta 400 ppm ja sisätiloissa suhteellista ilmankosteutta 39,5 %. Datapisteisiin sovitetut suorat on luotu MS Excelin suuntaviiva työkalulla, joka perustuu laskennallisesti pienimmän neliösumman menetelmään. Kontrolloituina verrokkeina toimivat CI-Systemsin valmistamat SR-800- ja SR-800N-sarjojen laajan pinta-alan mustan kappaleen verrokkisäteilijät. Niiden emissiivisyydet ovat valmistajan mukaan noin 98 %. Mittauksissa käytetty peili oli kovera polttovälin 150 mm kultapinnoitettu peili.

5.1 Kameran toiminnallisuuteen liittyvät mittaukset

Työn kokeellisen vaiheen alussa suoritettiin mittauksia, joiden avulla arvioitiin luvussa 4 esiteltyn kohteen radianssin absoluuttisten arvojen määrittämiseen mahdollisesti soveltuvien menetelmien potentiaalia sekä perehdyttiin kameran toiminnallisiin ominaisuuksiin. Kameran toiminnalliset ominaisuudet ovat työn kannalta tärkeässä asemassa, sillä suuri osa työn tuloksista perustuu oletukselle kameran vasteen lineaarisuudesta sekä herkkyyden säilymisestä muuttumattomana mittausolosuhteista riippumatta. Tässä luvussa esitellyt 2 mittausta suoritettiin

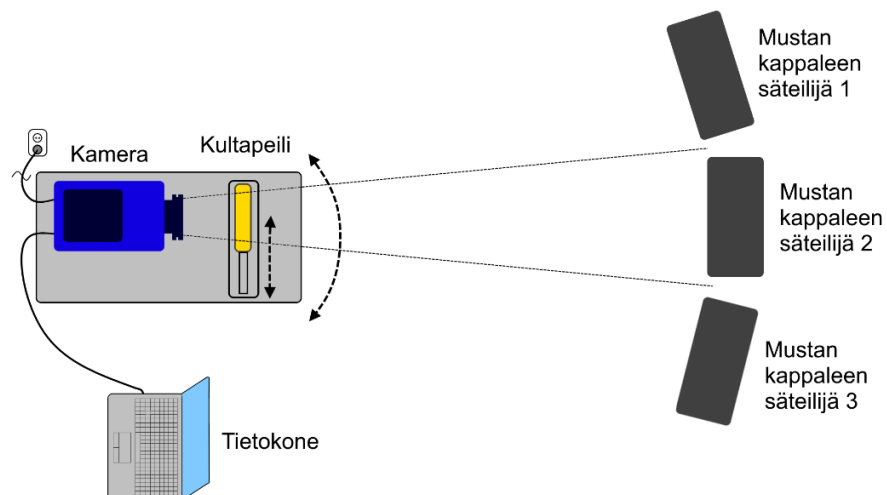
sisätiloissa stabiileissa olosuhteissa. Ensimmäisessä mittauksessa tavoitteena oli varmistaa kameran vasteen lineaarisuus sekä testata kuinka matala signaali peilistä saadaan mitattua. Toisen mittauksen tarkoituksena oli varmistaa, että eri integrointiajoilla mitatut tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia.

5.1.1 Mittaus peilistä ja tunnetuista verrokeista

Mittauksessa mitattiin koveraa kultapeiliä sekä kolmea mustan kappaleen verrokisäteilijää, jotka on esitetty Kuvassa 35. Mittauksen tavoitteena oli varmistaa kameran vasteen olevan lineaarista sekä testata miten peilistä mitattu digitaalilukuarvo vertautuu tunnettujen datapisteiden perusteella määritetyn kalibrointisuoran vakiotermiin. Mittausjärjestelyä on havainnollistettu Kuvassa 36. Mittauksen alussa kuvattiin peiliä, minkä jälkeen mitattiin yhtä verrokisäteilijää kerrallaan. Niiden pintalämpötilat olivat 30, 45 ja 60 °C. Mittausetäisyys verrokkeihin oli 2,5 m ja peiliin 3 cm.



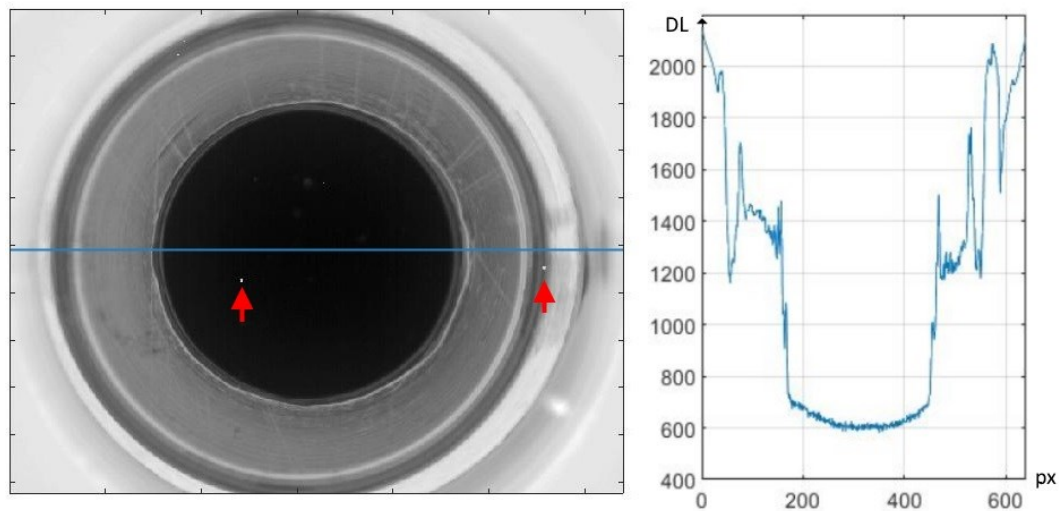
Kuva 35. Kolme tässä työssä käytettyä CI-Systemsin valmistamaa laajan pinta-alan mustan kappaleen säteilijää, joita käytettiin verrokisäteilijöinä. Vasemmalla kaksi erilaista SR-800N-mallia ja oikealla yksi SR-800-malli. Kontrolleriyksiköt näkyvät taustalla.



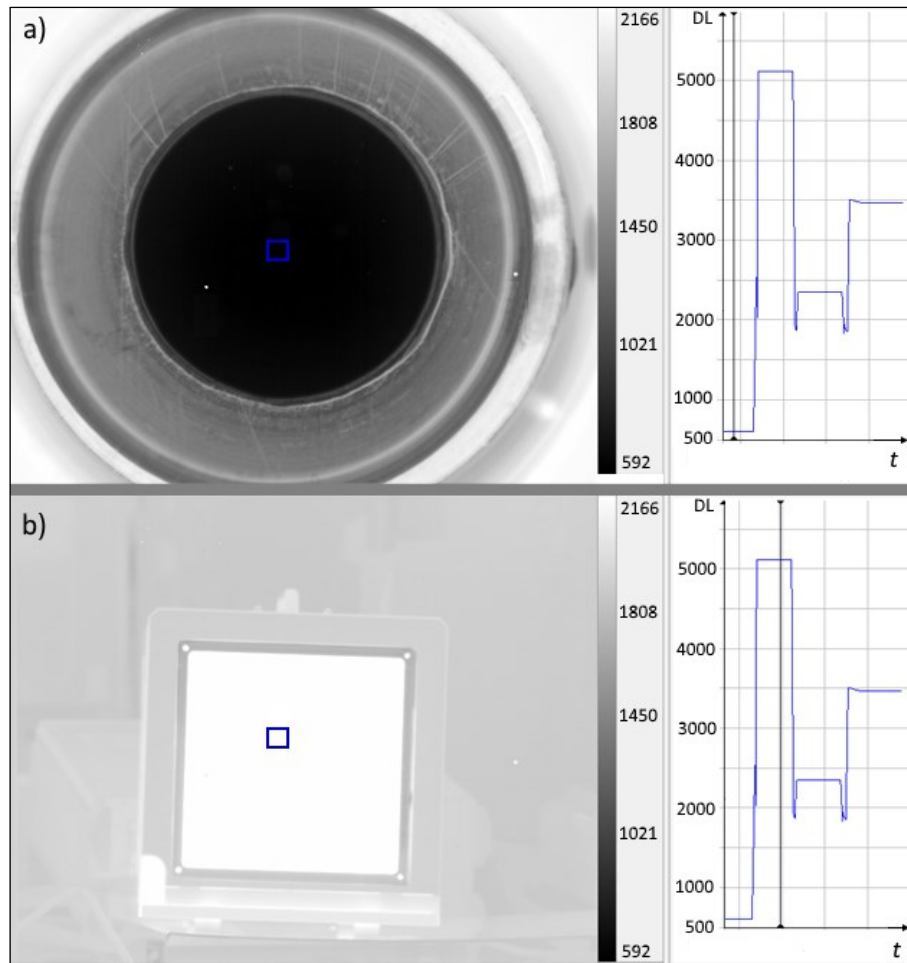
Kuva 36. Mittausjärjestely. Mittauksen aikana mitattiin koveraa peiliä ja kolmea verrokisäteilijää.

Kuvassa 37 on esitetty koveran kultapeilin kautta kuvattu kuva kamerasta itsestään. Mittaus on suoritettu normaalissa sisälämpötilassa. Kuvan keskellä oleva tumma alue on kameran jäähdytetty ilmaisin ja sen ympäristö. Oikean laidan kuvaajassa on esitetty kuvassa olevan sinisen viivan kohdalla olevat digitaalilukuarvot. Odotetusti kylmän ilmaisimen alueelta mitatut digitaalilukuarvot ovat selkeästi kaikkein matalimpia, noin 600 – 700 yksikköä. Olennaista on, että digitaalilukuarvot ovat pienimpiä mustan alueen keskellä ja merkittävästi korkeampi mustan alueen reunoilla. Kuvassa erottuu selkeästi kaksi valkoista huonoista pikseleistä koostuvaa joukkoa, jotka on merkitty punaisilla nuolilla. Kuvassa 38 on esitetty kaksi mittauksen aikana otettua kuvaa, yksi peilistä ja toinen SR-800-verrokkisäteilijästä. Oikean laidan kuvaajissa on esitetty kuvissa näkyvän sinisen neliön alueen pikselien keskiarvona määritetty digitaalilukuarvo. Kuvaajista nähdään, että ensin mitattiin 60 °C:n, sitten 30 °C:n ja lopuksi 45 °C:n lämpöinen verrokkisäteilijä.

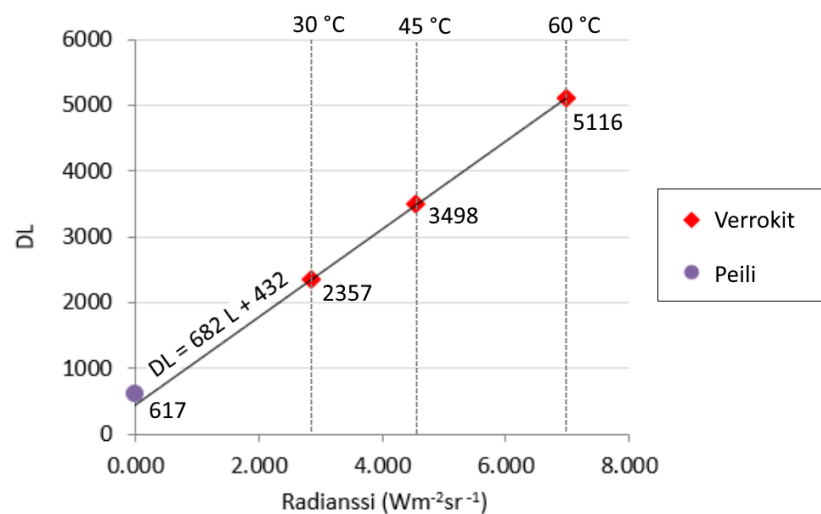
Mittauksen tuloksia on esitetty Kuvassa 39. Radianssit on määritetty laskennallisesti PVTUTKL:lla kirjoitetun MATLAB-funktion avulla kaavan 23 mukaisesti (kohteen emissiivisyys 0,98 ja ympäristön lämpötila 20 °C). Peilistä mitatun datapisteen radianssiksi on määritetty 0. Verrokkisäteilijöistä mitattuihin datapisteisiin on sovitettu suora. Peilistä mitattu digitaalilukuarvo 617 on varsin matala, mutta merkittävästi korkeampi kuin sovitesuoran vakiotermi 459, joka vastaa signaalin nollatasoa. Merkittävää on, että radianssien ja digitaalilukuarvojen riippuvuus on lineaarista, kuten kuuluukin. On huomioitava, että mahdolliset epätarkkuudet ilman vaimennuksen vaikutuksen arvioinnissa sekä kameran todellisen vasteen mahdollinen poikkeavuus valmistajan ilmoittamasta vasteesta voivat aiheuttaa radianssien laskennalliseen määrittämiseen epätarkkuutta.



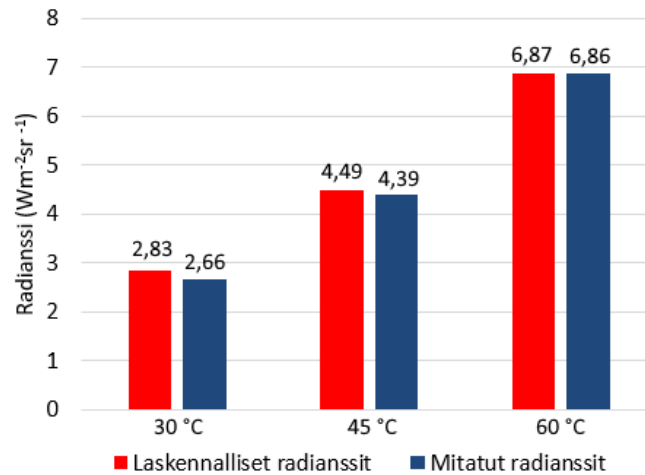
Kuva 37. Oikean laidan kuvaajassa on esitetty koverasta kultapeilistä otetussa kuvassa olevan sinisen viivan kohdalla olevat digitaalilukuarvot. Punaisilla nuolilla on merkitty kaksi huonoista pikseleistä koostuvaa joukkoa, jotka erottuvat kuvasta selkeästi.



Kuva 38. Kuvien vasemmassa laidassa kameran on kuvaama kohde ja oikeassa laidassa nelikulmaisen sinisen alueen pikseleiden digitaalilukuarvojen keskiarvo videon alusta loppuun. Vaaka-akselilla on aika. a) Kovera kultapeili, joka heijastaa kuvan kameran sisäisestä rakenteesta. b) 60 °C:n lämpöinen mustan kappaleen verrokkisäteilijä.



Kuva 39. 30, 45 ja 60 °C:n lämpöisistä verrokkisäteilijöistä ja koverasta kultapeilistä mitatut digitaalilukuarvot. Radianssit on määritetty laskennallisesti. Verrokeista mitattuihin datapisteisiin on sovitettu suora.

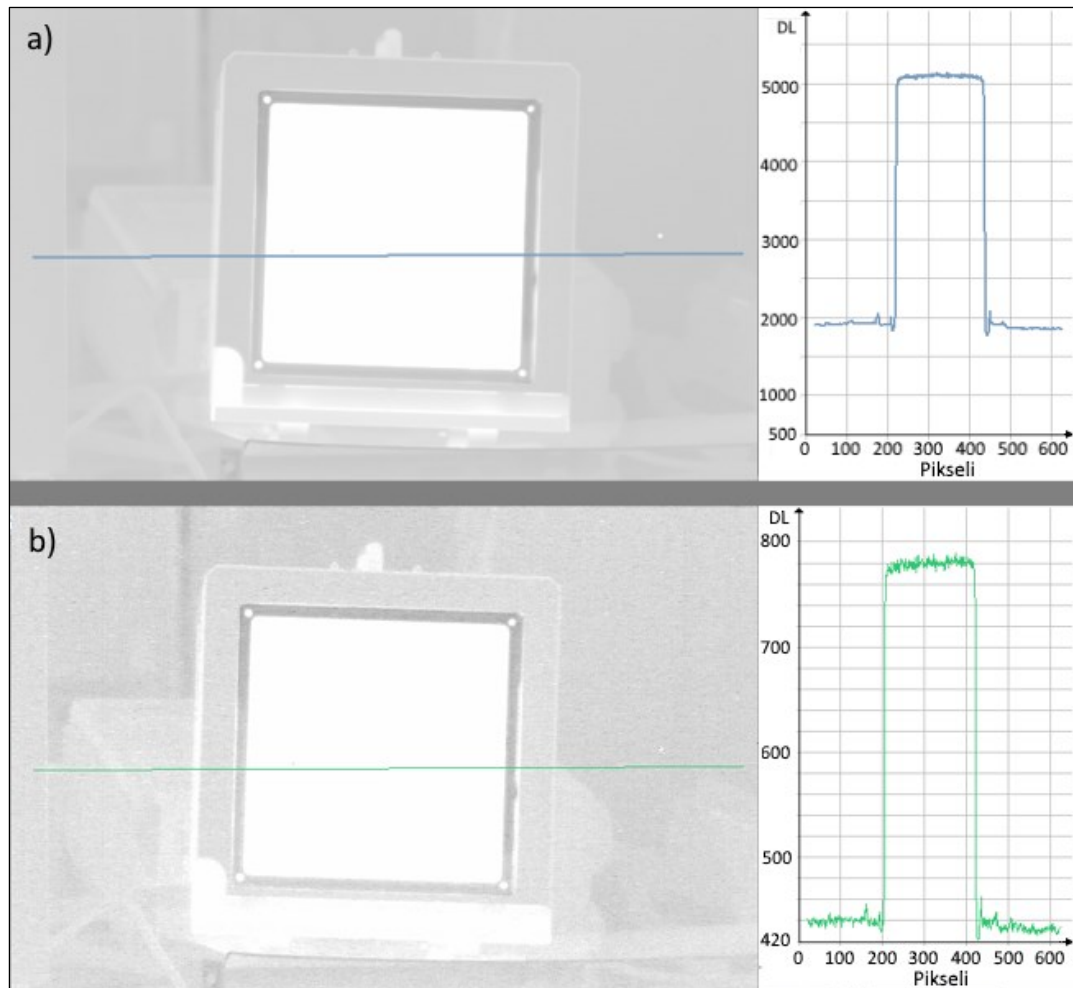


Kuva 40. 30, 45 ja 60 °C:n lämpöisistä verrokeista määritetyt radianssit.

5.1.2 Mittaukset eri integrointiajoilla

Toisessa mittaussarjassa kohteita mitattiin vaihtelevilla integrointiajoilla. Tavoitteena oli saada parempi käsitys siitä, miten integrointiaika vaikuttaa mittaustuloksiin. Lisäksi eri integrointiajoilla samoja kohteita mittaamalla voitaisiin myös laskennallisesti määrittää lukukohinan suuruus. Kuvassa 41 on esitetty kaksi kuvaa, jotka on otettu lämpimällä kameralla samasta 60 °C:n lämpöisestä verrokkisäteilijästä eri integrointiajoilla (250 ja 2000 μ s). Oikean laidan kuvaajissa on esitetty kuvissa olevien värikkäiden viivojen kohdilta määritetyt digitaalilukuarvot. Lyhyemmällä integrointiajalla otetussa kuvassa on selkeästi enemmän kohinaa. Sen voi huomata sekä kuvasta että kuvasta itsestään. Tämä johtuu siitä, että kamera kerää lyhyellä integrointiajalla vähemmän signaalia, jolloin satunnaisvaihtelun merkitys korostuu. Lyhyemmällä integrointiajalla mitatut digitaalilukuarvot ovat luonnollisesti paljon pienempiä kuin pitkällä mitatut. Niiden on kuitenkin pienempi kuin integrointiaikojen suhde 1:8. Syynä tähän on integrointiajasta riippumaton lukukohina, josta aiheutuva digitaalilukuarvo on suuruudeltaan vakio.

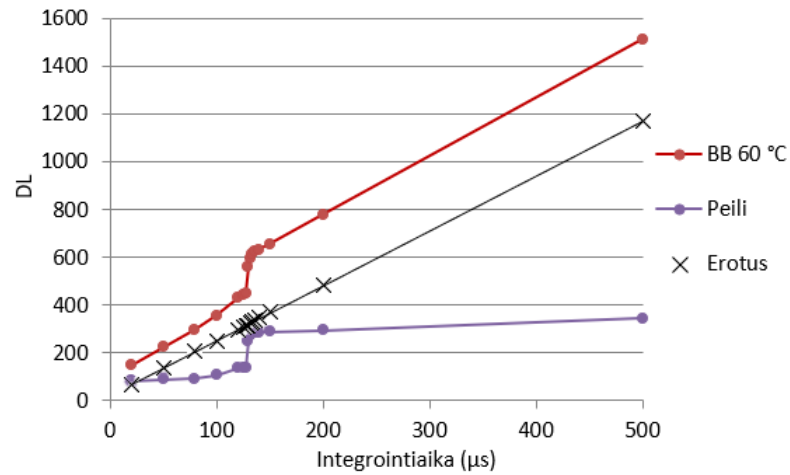
Mitattaessa vaihtelevilla lyhyillä integrointiajoilla huomattiin, että mitatun digitaalilukuarvon riippuvuus integrointiajasta ei aina ole perusoletuksen mukaisesti lineaarista. Tämä on hyvin odotamatonta. Asian selvittämiseksi eri integrointiajoilla suoritettiin mittauksia koverasta kultapeilistä sekä mustan kappaleen verrokkisäteilijästä, jonka lämpötila pidettiin vakiona. Myös muut mittaustapa-parametrit pysyivät vakioina, joten ainoa parametri, joka mittausten välillä muuttui, oli integrointiaika. Mittausten tulokset on esitetty Kuvassa 42. Tulosten perusteella riippuvuuden epälineaarisuus ei tapahdu yhdessä pisteessä, vaan vähitellen noin integrointiaikojen 128 – 135 μ s välillä. Huomion arvoista on, että kahdesta kohteesta, joiden radianssit ovat eri suuruiset (60 °C:n lämpöinen verrokkisäteilijä ja peili), mitattujen digitaalilukuarvojen erotus pysyy käytännössä vakiona läpi epäjatkuvuuskohdan. Käytännössä tämä tarkoittaa, että epäjatkuvuuskohdassa jokaiseen mitattuun signaaliin summautuu sama vakioarvo.



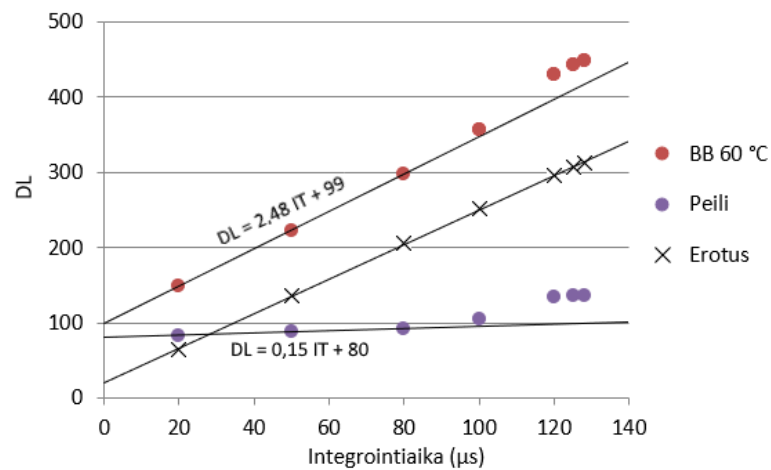
Kuva 41. Oikeassa laidassa olevien kuvaajien digitaalilukuarvot ovat kuvissa näkyvien vaakasuorien viivojen kohdilta. a) Integrointiajalla 2000 μs kuvattu 60 °C:n lämpöinen mustan kappaleen säteilijä. b) Integrointiajalla 250 μs kuvattu sama kohde. Lyhyemmällä integrointiajalla kuvatussa kuvassa on selvästi enemmän kohinaa.

Digitaalilukuarvon ja integrointiajan riippuvuuden lineaarisuutta epäjatkuvuuskohtaa lyhemmillä ja pidemmillä integrointiajoilla on tarkasteltu lähemmin Kuvissa 43 ja 44. Kuvasta 43 nähdään, että riippuvuus on lineaarista vasta integrointiajalla 80 μs ja sitä lyhyemmillä integrointiajoilla. Integrointiajalla 140 μs ja sitä pidemmillä integrointiajoilla mitatut digitaalilukuarvot taas kasvavat lineaarisesti integrointiajan kasvaessa, kuten Kuvasta 43 nähdään. Riippuvuuden epälineaarisuusalue on siis noin 80 – 140 μs . Epälineaarisuuden syy on todennäköisesti lukukohinan määrän muutos, sillä muutokselle ei ole fysikaalisesti mitään muuta perustetta.

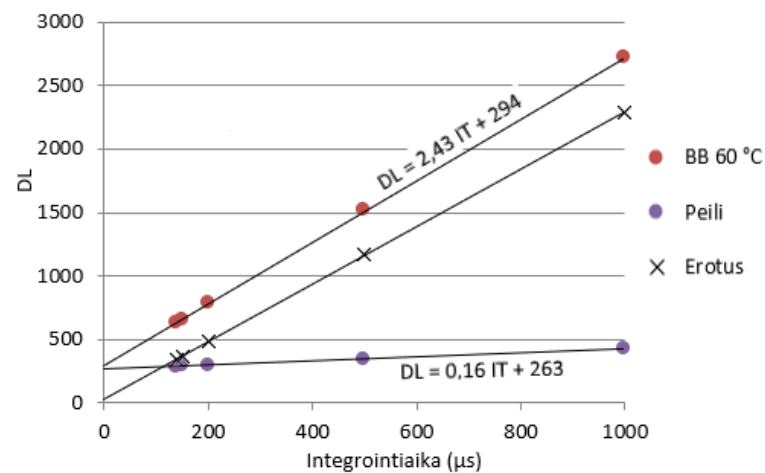
Kameran ulostulosignaalin (digitaalilukuarvojen) ja integrointiajan riippuvuuden epälineaarisuusalueen löytäminen ja sen määrittäminen ovat tärkeitä havaintoja, jotka vaikuttavat merkittävästi mittausten suorittamiseen jatkossa. Alue on otettava huomioon määritettäessä mitattavista kohteista absoluuttisia arvoja tai suoritettaessa kvantitatiivista kalibrointia usealla eri integrointiajalla: on käytettävä ainoastaan yli 140 μs :n (tai ali 80 μs :n) integrointiaikoja. Jos kahta tai useampaa samalla integrointiajalla mitattua kohdetta vain vertaillaan keskenään, epälineaarisuusalueella ei ole vaikutusta tuloksiin.



Kuva 42. Noin integrintiajan 130 μ s kohdalla on digitaalilukuarvon ja integrintiajan riippuvuudessa havaittavissa selkeä epälineaarisuuskohta. Arvojen erotus pysyy kuitenkin vakiona.



Kuva 43. Epäjatkuvuuskohtaa lyhemmillä integrintiajan arvoilla mitattuja tuloksia. Signaali kasvaa lineaarisesti vasta 80 μ s:a ja sitä lyhemmillä integrintiajoilla. Sovitesuorat on sovitettu 20, 50 ja 80 μ s:n integrintiajoilla mitattuihin datapisteisiin.



Kuva 44. Epäjatkuvuuskohtaa pidemmillä integrintiajan arvoilla (140 – 1000 μ s) mitattuja tuloksia. Mitatut digitaaliluvut kasvavat lineaarisesti 140 μ s:n ja sitä pidemmillä integrintiajoilla.

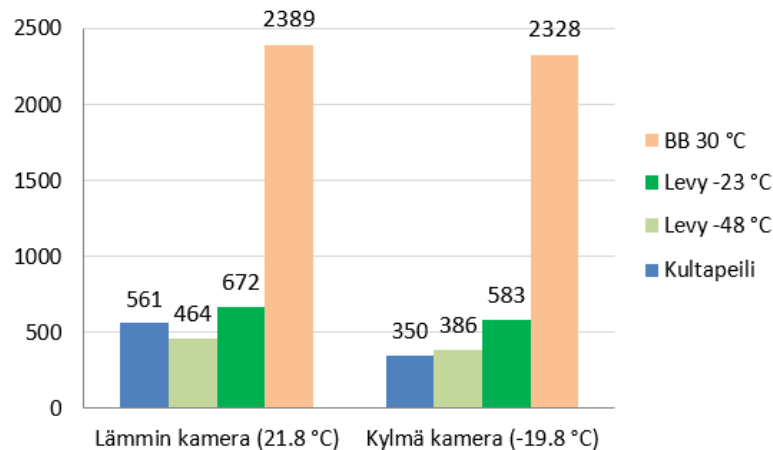
5.2 Hallitut kylmän olosuhteen mittaukset

PVTUTKL:lla on kaksiosainen pakkashuone pakkasessa säilytettäväksi tarkoitettujen aineiden varastointia varten. Pakkashuoneen suuremman ulompana sijaitsevan osan lämpötila oli vakioitu noin -23 °C :een. Sisemmän huoneen lämpötilan sai laskettua noin -50 °C :een. Pakkashuoneessa suoritettujen mittausten tärkeimpänä tarkoituksena oli selvittää, pystytäänkö koveralla kultapeilillä selvittämään nollataso riittävällä tarkkuudella mitattaessa hyvin kylmiä kohteita. Lisäksi keskeisessä asemassa oli testata miten kameran ja peilin lämpötilat vaikuttavat peilistä mitatun signaalin suuruuteen. Pakkashuone mahdollisti useiden erityyppisten mittausten suorittamisen. Jos kylmä kohde, peili tai kamera olisi viety kylmästä lämpimään mittauksen ajaksi, niiden pintaan (erityisesti kameran linssin ja peilin pintaan) muodostuva huurre olisi vaikuttanut mittaustuloksiin merkittävästi.

Pakkashuoneessa suoritettiin useita erilaisia mittauksia, joissa vaihdeltiin muuttuvia parametreja, kuten kameran ja koveran kultapeilin lämpötiloja mittauksen aikana. Koska CI-Systemsin valmistamien mustan kappaleen verrokisäteilijöiden pintalämpötilaa ei voida säätää pakkasasteille eikä niitä ole tarkoitettu toimimaan pakkasessa, pakkashuonemittauksiin valmistettiin kaksi erilaista mittauskohdetta: Kaksi alumiinilevyä maalattiin mattamustalla spraymaalilla. Toisen takapuolelle liimattiin eristeeksi parin sentin paksuinen styrox-levy. Eristelevyn tarkoitus oli hidastaa alumiinilevyn lämpötilan muutosta, jos sitä jouduttiin siirtämään esimerkiksi kylmemmästä pakkashuoneesta lämpimämpään.

5.2.1 Peilin ja tunnettujen verrokkien herätteiden vertailu kylmällä ja lämpimällä infrapunakameralla

Eräässä pakkashuoneessa suoritettussa mittauksessa mitattiin sekä lämpimällä että kylmällä kameralla polttovälin 150 mm koveraa kultapeiliä, kahta kylmää mustaksi maalattua alumiinilevyä sekä 30 °C :n lämpöistä mustan kappaleen verrokisäteilijää. Toinen alumiinilevy oli stabiilissa tilassa pakkashuoneen lämpimämmällä puolella (-23 °C) ja toinen, takapuolelta eristetty, levy kylmemmällä puolella (-48 °C). Levyjen lämpötilat olivat siis -23 ja -48 °C . Kylmempää levyä mitattaessa ovi kylmemmälle puolelle avattiin hetkeksi. Lämpimällä kameralla suoritettu mittaus suoritettiin valmistelemalla kamera mittaustavaksi pakkashuoneen ulkopuolella. Peili ja 30 °C :n lämpöinen verrokisäteilijä mitattiin pakkashuoneen ulkopuolella. Tämän jälkeen kamera siirrettiin -23 °C :n lämpöiseen pakkashuoneeseen, jossa mitattiin -23 °C :n lämpöinen levy, minkä jälkeen avattiin ovi kylmempään pakkashuoneeseen, jossa mitattiin -48 °C :n lämpöinen levy. Mittaus oli yhtäjaksoinen ja kesti alle minuutin, joten kameran lämpötila ei oleellisesti ehtinyt muuttua mittauksen aikana. Merkille pantavaa on, että kameran lisäksi myös peili oli mittauksen aikana lämmin. Kylmällä kameralla suoritettu mittaus suoritettiin kameran stabiloiduttua -23 °C lämpöisessä pakkashuoneessa. Kameran stabiloiduttua sen rungon lämpötila oli $-19,8\text{ °C}$. Peili oli stabiloitunut pakkashuoneeseen, eli sen pintalämpötila oli -23 °C . Myös lämmin verrokisäteilijä oli pakkashuoneessa. Mittausetäisyys kameranlinssistä kohteisiin oli noin 5 cm, paitsi peilin tapauksessa noin 1 cm.



Kuva 45. Kylmällä ja lämpimällä kameralla 30 °C:n lämpöisestä verrokkisäteilijästä, -23 ja -48 °C:n lämpöisistä mustiksi maalatuista alumiinilevyistä sekä koverasta kultapeilistä mitattuja digitaalilukuarvoja.

Mittauksen tulokset on esitetty Kuvassa 45. Kaikista kohteista mitatut digitaalilukuarvot ovat merkittävästi korkeampia mitattuna lämpimällä kameralla kuin kylmällä kameralla. Merkittävimmät tulokset ovat, että lämpimällä kameralla lämpimästä peilistä mitattu digitaalilukuarvo on pienempi kuin -23 °C:n lämpöisestä levystä mitattu digitaalilukuarvo, mutta suurempi kuin -48 °C:n lämpöisestä levystä mitattu digitaalilukuarvo. Kylmällä kameralla kylmästä peilistä mitattu digitaalilukuarvo taas on pienempi kuin kummastakaan kylmästä levystä mitattu digitaalilukuarvo. Peilistä siis saadaan mitattua joka tapauksessa hyvin matalia signaaleja, mutta kameran ja peilin lämpötiloilla on hyvin merkittävää vaikutusta peilistä mitatun signaalin suuruuteen: mitatun digitaalilukuarvon muutos mittauksen välillä oli peilin tapauksessa noin kolminkertainen verrattuna muihin kohteisiin. Peilistä mitattu digitaalilukuarvo laski 211 yksikköä, joka vastaa noin $0,30 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$:n muutosta radianssissa. Muista kohteista mitattu arvo laski puolestaan keskimäärin vain 76 yksikköä, mikä vastaa radianssin muutosta noin $0,11 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$:lla. Syynä tähän eroon muutoksissa on loissäteilyn heijastuminen peilin kautta ilmaisimelle, mikä vahvistaa sen vaikutusta, sekä peilin emissio, jonka voimakkuus riippuu sen lämpötilasta. Sitä kuinka suuri osuus muutoksesta johtuu kameran lämpötilasta ja kuinka suuri osuus peilin lämpötilasta käsitellään seuraavissa kahdessa luvussa.

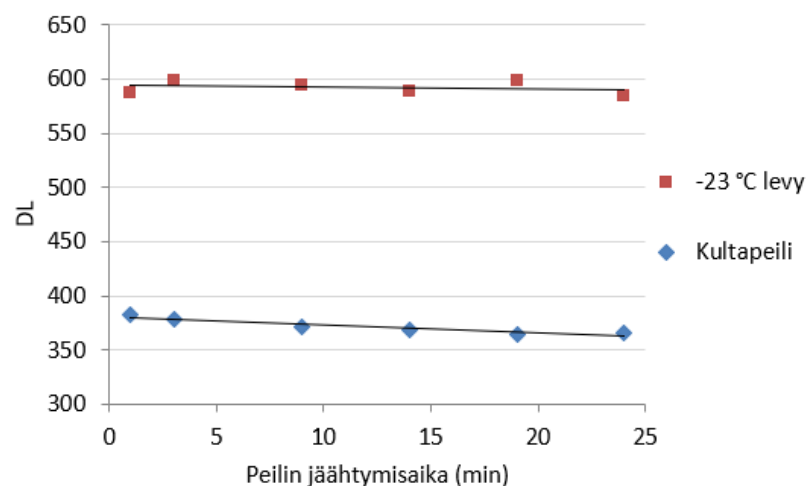
Työn aikana koveraa kultapeiliä kuvattiin myös muilla infrapunakameroilla. Testeissä huomattiin, että kaikilla jäähdytetyillä kameralla peilistä ei saatu mitattua hyvin matalia arvoja. Esimerkiksi eräällä jäähdytetyllä kameralla peilistä mitattiin paljon suurempi signaali kuin pakka- sesta otetusta kylmäkalesta. Kovera kultapeili soveltuu siis nollatason selvittämiseen vaihtelevasti kameran tyypistä riippuen.

5.2.2 Peilin lämpötilan vaikutus ulostulosignaaliin

Koverasta kultapeilistä mitatun digitaalilukuarvon riippuvuutta peilin lämpötilasta tutkittiin mittamalla peiliä pakkahuoneessa (-23 °C) peilin eri lämpötiloilla. Tavoitteena oli päätellä kuinka pal-

jon peilin lämpötila vaikuttaa siitä mitattuun digitaalilukuarvoon. Kamera oli stabiloitunut pakka- seen. Sen rungon lämpötila mittauksen alussa oli $-19,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Peiliä pidettiin ennen mittausta muovipussin sisällä lämpimässä vesihauteessa ja sen takapintaan kiinnitettiin kädenlämmitin. Peili vietiin pakkahuoneeseen ja ensimmäinen mittaus suoritettiin noin minuutin kuluttua peilin poistamisesta vesihauteesta. Peilin lämpötilaa ei mitattu mittauksen aikana. Ensimmäisen mittauksen hetkellä peilin lämpötila oli arviolta yli $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ensimmäisen mittauksen jälkeen kädenlämmitin poistettiin ja peilin annettiin jäähtyä. Peilin jäähtyessä mittauksia suoritettiin noin 5 minuutin välein. Peilin lisäksi joka kerta mitattiin verrokiksi pakkahuoneeseen stabiloitunut mustaksi maalattu alumiinilevy. Kameran runko lämpeni mittauksen aikana noin $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, mikä on saattanut vaikuttaa tuloksiin hieman. Lisäksi juuri ennen ensimmäistä mittausta pakkahuoneen ovi avattiin, jotta peili saatiin sisälle huoneeseen. Tällöin huoneeseen on päässyt lämmintä ilmaa. Mittausetäisyys on kuitenkin ollut niin lyhyt (noin 1cm), että sillä ei ole merkittävää vaikutusta.

Mittauksen tulokset on esitetty Kuvassa 46. Tuloksista nähdään, että peilistä mitattu digitaalilukuarvo pienenee peilin jäähtyessä. Verrokkina toimivasta levystä mitattu digitaalilukuarvo puolestaan pysyy mittauksen aikana mittaustarkkuuden rajoissa vakiona. Ensimmäisen ja viimeisen mittauksen välillä digitaalilukuarvon lasku on kuitenkin vain noin 15 yksikköä, joka vastaa noin $0,02\text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$:n muutosta radianssissa. Tämä vastaa noin 2 %:a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpöisen mustan kappaleen säteilijän radianssista. Peilin heijastavuus on valmistajan mukaan noin 97 %, jolloin sen emissiivisyys on noin 3 %. Kameran lämpötila nousi $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ mittauksen aikana. Tämän seurauksena peilin lämpötilan muutoksesta aiheutuva digitaalilukuarvon muutos on todellisuudessa todennäköisesti hieman suurempi kuin 15 yksikköä: noin 20 yksikköä, mikä vastaa noin 3 %:a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpöisen mustan kappaleen säteilijän radianssista. Tulos on siis varsin hyvin odotusten mukainen. Peilin emission muutos vastaa noin 10 %:n osuudesta edellisessä luvussa esitellystä peilistä mitatun herätteen muutoksesta, joka aiheutui kameran rungon ja peilin lämpötilojen muutoksista. Peilin lämpötilan vaikutus siitä mitattuun digitaalilukuarvoon on siis varsin vähäinen, mutta kuitenkin merkittävä.



Kuva 46. Pakkahuoneessa ($-23\text{ }^{\circ}\text{C}$) jäähtyvistä koverasta kultapeilistä sekä stabiloituneesta mustaksi maalatusta alumiinilevystä ($-23\text{ }^{\circ}\text{C}$) kylmällä kameralla ($-19,8\text{ }^{\circ}\text{C}$) mitattuja tuloksia.

5.2.3 Kameran rungon lämpötilan vaikutus ulostulosignaaliin

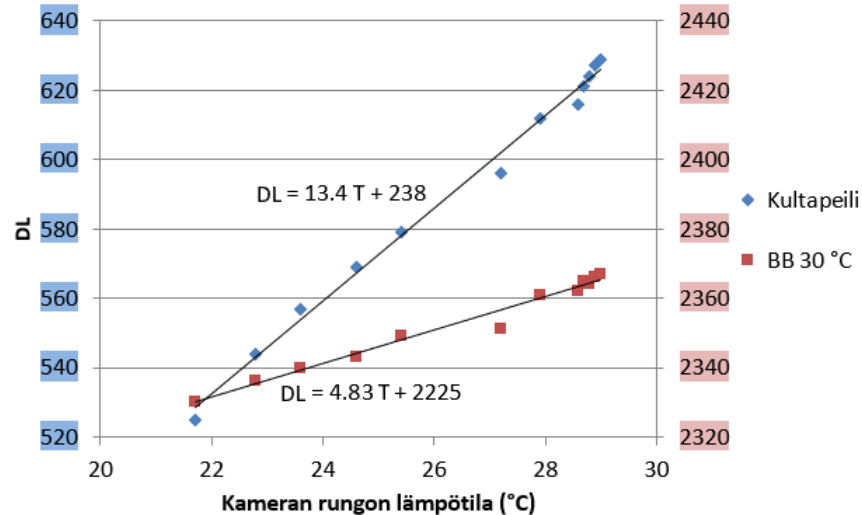
Koverasta kultapeilistä mitatun digitaalilukuarvon riippuvuutta kameran rungon lämpötilasta tutkittiin suorittamalla mittaussarjoja, joissa kameran rungon lämpötila muuttui ja kaikki muut mitausparametrit pysyivät vakioina. Kamera mittasi runkonsa lämpötilaa sisäisellä sensorilla. Vastaavan kaltaiset mittaussarjat suoritettiin sekä sisätiloissa normaalissa sisälämpötilassa että pakkashuoneessa. Mittauksissa käytettiin polttovälin 150 mm peiliä. Lämpimässä suoritettussa mittauksessa kamera käynnistettiin normaalissa huoneenlämpötilassa (21 °C) ja mittaussarja aloitettiin heti, kun kameran ilmaisin oli jäähtynyt vaaditulle tasolle. Tämän jälkeen kameran annettiin lämmitä itsestään. Kameralla mitattiin sekä 21 °C:n lämpöistä peiliä että 30 °C:n lämpöistä mustan kappaleen verrokisäteilijää. Ensimmäinen mittaus suoritettiin 5 min kameran käynnistämisestä ja tämän jälkeen aluksi 10 minuutin välein ja 45 min jälkeen harvemmin. Kameran voitiin katsoa stabiloituneen vasta noin 150 minuuttia käynnistämisen jälkeen. Tämän jälkeen se lämpeni enää 0,5 °C. Kameran lämpötila nousi lopulta noin 29 °C:een. 25 °C:n lämpötilaan kameran runko nousi 40 minuutissa käynnistämisestä. Mittauksen tulokset on esitetty Kuvassa 47. Datapisteisiin on sovitettu suorat kuvaamaan mitattujen herätteiden riippuvuutta kameran rungon lämpötilasta.

Pakkashuoneessa suoritettiin identtiset mittaussarjat yhteensä kahtena eri päivänä. Mittauksissa lämmin kamera vietiin eristävässä styrox-laatikossa pakkashuoneeseen, jonka lämpötila oli noin -23 °C. Kamera kytkettiin virtalähteeseen ja käynnistettiin heti, kun se saatiin sisälle huoneeseen. Kamera pidettiin laatikossa, kunnes se oli valmis mittaukseen. Tämän jälkeen se otettiin ulos laatikosta ja valmisteltiin mittaukseen. Kultapeilin oli annettu stabiloitua pakkashuoneen lämpötilaan. Mitattava verrokkikohde oli ympäristön lämpöinen (-23 °C) mustaksi maalattu alumiinilevy. Ensimmäiset mittaukset saatiin suoritettua noin 7 minuuttia kameran ottamisesta pois styrox-laatikosta eli noin 12 min käynnistämisen jälkeen. Kamera stabiloitui -18 °C:een eli 5 °C ympäristöään lämpimämmäksi noin 50 minuuttia styrox laatikosta poistamisesta. Ennen laatikosta poistamista kamera oli kuitenkin jäähtynyt merkittävästi. Todelliseksi stabiloitumisajaksi näissä olosuhteissa voidaan arvioida hieman yli tunti. Mittausten tulokset on esitetty Kuvassa 48.

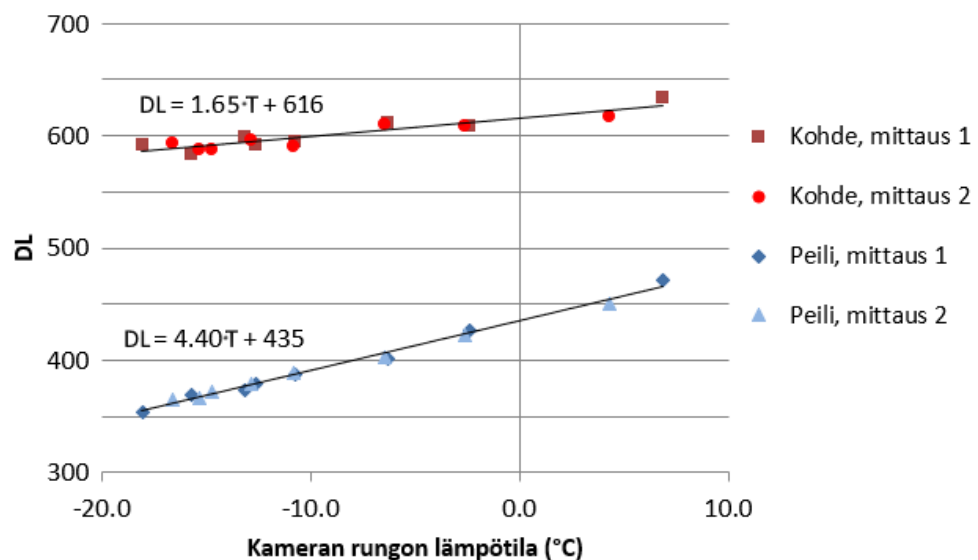
Kuten Kuvan 47 sovitesuorien kulmakertoimista nähdään, kameran rungon lämmitessä noin 22 °C:sta 29 °C:een, koverasta kultapeilistä mitattu digitaalilukuarvo kasvaa noin $(13,4/4,38 =) 3,06$ kertaa voimakkaammin kuin verrokisäteilijästä mitattu digitaalilukuarvo. Kuvasta 48 nähdään, että pakkashuoneessa suoritettujen kahden mittauksen tulokset olivat liki identtiset, mikä lisää tulosten luotettavuutta. Näiden mittausten tulosten perusteella kameran rungon lämmitessä noin 7 °C:sta -18 °C:een, peilistä mitattu digitaalilukuarvo kasvaa noin $(4,40/1,65 =) 2,67$ kertaa voimakkaammin kuin kohteesta mitattu digitaalilukuarvo.

Kohteesta mitatun digitaalilukuarvon voimakkuuden kasvu johtuu vain kameran sisäisen loissäteilyn kasvusta. Syy peilistä mitatun digitaalilukuarvon voimakkaampaan riippuvuuteen kameran rungon lämpötilasta johtuu ilmaisimelle peilin kautta heijastuneesta kameran rungosta lähtöisin olevasta loissäteilystä. Tulosten perusteella kameran lämpötila vaikuttaa peilistä mitatun signaa-

lin suuruuteen paljon enemmän kuin peilin lämpötila. Lisäksi merkittävää on, että kameran lämpötilan muutos aiheuttaa korkeassa lämpötilassa aiheuttaa suuremman kohteesta mitatun signaalin kasvun kuin saman suuruinen lämpötilan muutos kylmässä lämpötilassa. Syy tähän on mustan kappaleen säteilyn voimakkuuden eksponentiaalinen riippuvuus kappaleen lämpötilasta.



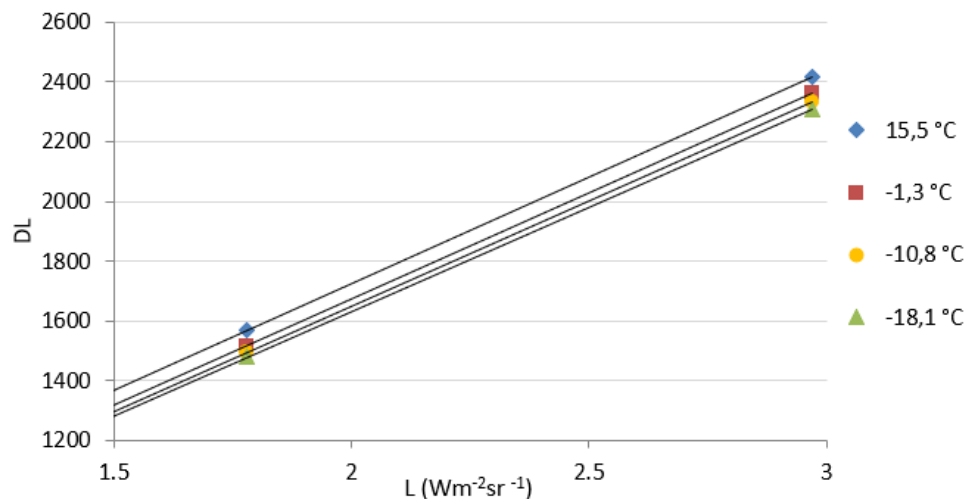
Kuva 47. Digitaalilukuarvon riippuvuus kameran rungon lämpötilasta kameran lämmitessä huoneenlämmössä. Peilistä mitattu digitaalilukuarvo (vasen pysty akseli) kasvaa noin 3 kertaa nopeammin kuin kohteesta mitattu digitaalilukuarvo (oikea pysty akseli).



Kuva 48. Kohteesta (-23 °C) ja peilistä mitattujen digitaalilukuarvojen riippuvuus kameran rungon lämpötilasta kameran kylmetessä pakkasessa. Peilistä mitatun digitaalilukuarvon riippuvuus rungon lämpötilasta on huomattavasti voimakkaampaa kuin kohteesta mitatun arvon.

Toisen pakkashuoneessa suoritetun mittaussarjan tuloksia on esitetty Kuvassa 49. Mittaus-sarja on suoritettu pakkashuoneessa mittaamalla 15 ja 30 °C:n lämpöisiä mustan kappaleen ver-rokkisäteilijöitä vaihtelevilla kameran rungon lämpötiloilla. Datapisteiden radianssit kameran vas-tealueella on laskettu kaavan 23 mukaisesti kohteen emissiivisyydellä 0,98 sekä ympäristön ja ilman lämpötiloilla -23 °C. Mittausetäisyys kohteisiin oli noin 10 cm ja peiliin noin 1 cm. 15 °C:n lämpöisen verrokkisäteilijän radianssiksi määritettiin laskennallisesti $1,78 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ ja 30 °C:n lämpöisen $2,97 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$. Datapisteisiin sovitettujen suorien yhtälöt on esitetty Taulukossa 8. Taulukossa on lisäksi esitetty samoissa mittauksissa koverasta kultapeilistä mitatut digitaaliluku-arvot.

Lukukohinan, pimeävirran ja loissäteilyn aiheuttamaa poikkeamaa kuvaavat sovitesuorien vakiotermi odotetusti pienenevät merkittävästi kameran lämpötilan laskiessa, sillä tällöin loissä-teilyn määrä vähenee. Myös peilistä mitatut digitaalilukuarvot odotetusti laskevat kameran jääh-tyessä, mutta ne ovat merkittävästi suurempia kuin sovitesuorien vakiotermi. Peilistä mitattujen arvojen ja vakiotermien erotus kuitenkin pienenee kameran jäähtyessä. Erotus noin puolittuu ka-meran jäähtyessä 15,5 °C:sta -18,1 °C:een. Edellisissä luvuissa esitettyjen tulosten tapaan tämä



Kuva 49. Pakkashuoneessa kameran rungon eri lämpötiloilla 15 ja 30 °C lämpöisistä verrokkisäteilijöistä integrointiajalla 2000 μs mitattuja tuloksia. Verrokkikohteiden radianssit on määritetty laskennallisesti. Sovitesuorien yhtälöt on esitetty Taulukossa 8.

Taulukko 8. Kuvan 49 sovitesuorien yhtälöt sekä samoissa mittauksissa koverasta kultapeilistä mitatut digitaalilukuarvot. Vakiotermi/poikkeaman lisäksi myös kulmakerroin pienenee kameran rungon lämpötilan laskiessa.

Kameran lämpötila	Sovitesuora	Peilistä mitattu DL
15,5 °C	$DL = 713,1L + 300,2$	546
-1,3 °C	$DL = 708,9L + 255,7$	433
-10,8 °C	$DL = 704,7L + 242,2$	389
-18,1 °C	$DL = 698,8L + 235,6$	352

viittaa siihen, että kylmällä kameralla peilistä määritetty signaali vastaa paremmin todellista nollatasoa kuin lämpimällä kameralla määritetty. Siihen, kuinka hyvin sovitesuorien vakiotermiä todellisuudessa vastaavat nollatasoa, vaikuttaa moni tekijä. Esimerkiksi verrokkisäteilijöiden todellisuudessa säteilemät radianssit saattavat poiketa laskennallisesti määritetyistä, sillä niitä ei ole suunniteltu toimimaan näin alhaisissa ympäristön lämpötiloissa. Lisäksi mikäli kameran vaste ei täysin vastaa valmistajan ilmoittamaa, se aiheuttaa laskennallisiin radianseihin virhettä, joka taas muuttaa sovitesuorien vakiotermien arvoja.

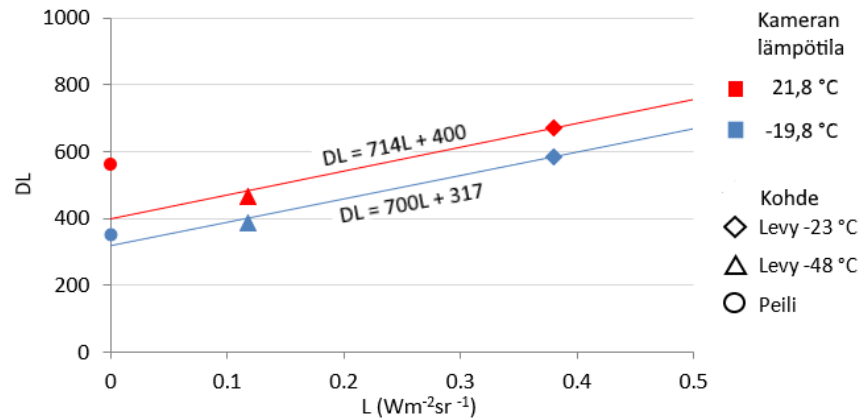
Vakiotermien lisäksi myös sovitesuorien kulmakertoimet johdonmukaisesti hieman pienevät kameran rungon lämpötilan laskiessa, mikä on odottamatonta. Näiden mittaustulosten perusteella kulmakertoimien muutosten aiheuttamat mittaustulosten virheet ovat samaa suuruusluokkaa kuin vakiotermien muutosten aiheuttamat virheet. On myös mahdollista, että kulmakertoimien muutokset johtuvat ainakin osaksi siitä, että verrokkisäteilijöiden lämpötilat eivät ole olleet aivan stabiilit, sillä niitä ei ole suunniteltu toimimaan kylmissä olosuhteissa. Lisäksi mahdolliset pienet muutokset ympäristön lämpötilassa, ilmankosteudessa tai hiilidioksidin pitoisuudessa, kuten myös mahdollinen kosteuden tai huurteen kerääntyminen mitattavien kohteiden pinnalle, ovat saattaneet vaikuttaa tuloksiin.

5.2.4 Absoluuttisten signaalien määrittäminen tunnetun verrokkisäteilijän avulla

Absoluuttisten signaalien määrittämistä tutkittiin koveraa kultapeiliä hyödyntävän menetelmän lisäksi myös toisella menetelmällä. Tässä menetelmässä hyödynnetään tunnettua verrokkisäteilijää. Menetelmä on esitelty luvussa 4.2. Menetelmä perustuu sille, että mittauksen aikana mitataan peiliin verrattuna korkeaherätteistä verrokkisäteilijää, jonka radianssi tiedetään tarkasti. Hyvä vaihtoehto olisi käyttää verrokkia, joka on ympäristön lämpöinen. Tällöin verrokki on termisessä tasapainossa ympäristönsä kanssa eikä sen pinnasta heijastuva säteily käytännössä vaikuta sen pinnasta lähtevän säteilyn määrään, vaikka sen emissiivisyys olisi selkeästi alle 1. Lisäksi väliaikainen vaikutus radianssiin olisi mitätön.

Menetelmän toimivuutta voidaan arvioida mittaustuloksilla, jotka ovat luvussa 5.2.1 esitetyistä mittauksista. Mittaukset suoritettiin pakkahuoneessa -23 °C :n lämpötilassa kahdella eri kameran lämpötilalla. Mittausten aikana mitattiin mustan kappaleen verrokkisäteilijöitä sekä ympäristön lämpöistä (-23 °C) ja kylmempää (-48 °C) mustaa alumiinilevyä korkealla ja matalalla kameran rungon lämpötilalla. Levyjen mittaaminen vastaa varsin hyvin tilannetta, jossa kovalla pakkasella mitataan ympäristön lämpöistä verrokkia sekä kylmää pilvetöntä taivasta.

Sovittamalla suorat mustan kappaleen verrokkisäteilijöistä mitattuihin datapisteisiin, saadaan selvitettyä kameran vastetta kuvaavat kulmakertoimet. Kalibroituisuorat määritettiin siis tässä tapauksessa sovittamalla suora datapisteisiin, jotka on mitattu mustan kappaleen verrokkisäteilijöistä ja muuttamalla suoran vakiotermiä siten, että se kulkee ympäristön lämpöisestä verrokista (-23 °C levy) mitatun tunnetun datapisteen kautta. Mitatut datapisteet sekä kalibroituisuorat on esitetty Kuvassa 50.



Kuva 50. 21,8 ja -19,8 °C:n lämpöisellä kameralla mitattuja tuloksia sekä kalibrointisuorat. Radianssit on määritetty laskennallisesti.

Taulukko 9. Kohteesta mitatut digitaalilukuarvot sekä verrokin avulla määritetyt radianssin absoluuttiset arvot.

Kameran lämpötila	Kohteen lämpötila	DL	Laskennallinen radianssi ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$)	Määritetty radianssi ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$)	Virhe ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$)
21,8 °C	-48 °C	464	0,118	0,090	0,028
-19,8 °C	-48 °C	386	0,118	0,100	0,018

Tällä menetelmällä kohteen (-48 °C levy) radianssi voidaan selvittää yksinkertaisesti selvittämällä millä radianssin arvolla suoran arvoksi tulee kohteesta mitattu digitaalilukuarvo. Taulukossa 9 on esitetty menetelmällä -48 °C:n lämpöisestä levystä määritetyt radianssin absoluuttiset arvot. Kuten tuloksista nähdään, menetelmällä päästään kohtuulliseen tarkkuuteen määrittäessä matalaherätteisen kohteen radianssin absoluuttisia arvoja. Kylmällä kameralla tarkkuus oli parempi kuin lämpimällä kameralla. Erityisen huomion arvoista on, että jos kalibrointisuoran vakiotermi olisi määritetty peilistä mitatun arvon perusteella, virhe olisi ollut paljon suurempi. On myös huomioitava, että laskennallisesti (kaavalla 23) määritetyt laskennalliset radianssit eivät välttämättä täysin pidä paikkaansa, joten osa virheestä voi johtua siitä. Syy tähän on epävarmuus kameran vasteen paikkansapitävyydestä, sillä työssä käytettiin kameran valmistajan ilmoittamaa spektrivastetta. Kameran todellista vastetta ei työn aikana kyetty määrittämään.

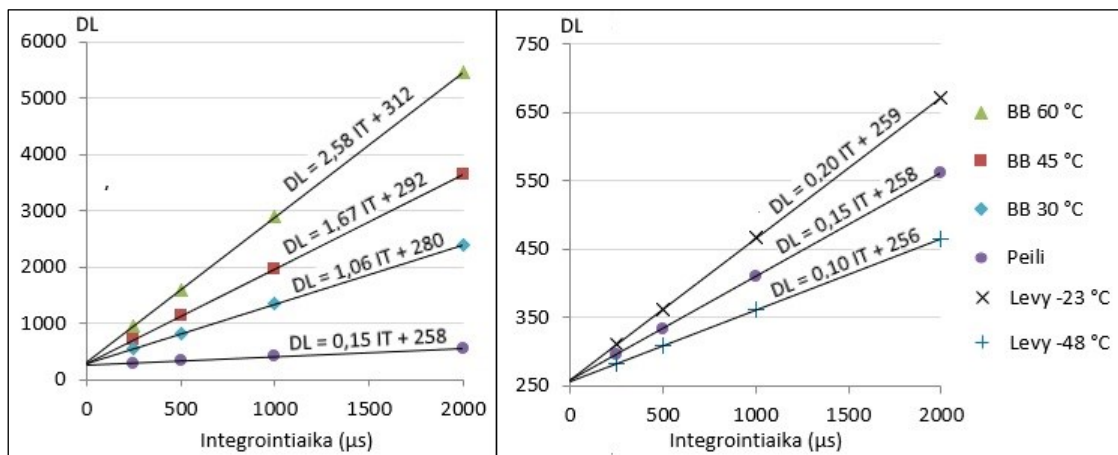
5.2.5 Kameran lukukohinatason määrittäminen

Työssä käytetyn kameran lukukohinatason pyrittiin määrittämään mittaamalla useita eri kohteita monella eri integrointiajalla. Toisin kuin muiden signaalin komponenttien: kohteen herätteen, loissaiteilyn ja pimeävirran suuruudet, lukukohinan suuruus ei riipu integrointiajasta, vaan se on aina vakio. Täten integrointiajalla nolla kameran ulostulosignaali koostuu ainoastaan lukukohinasta. Lukukohinaa lukuun ottamatta muiden ulostulosignaalin komponenttien osuus kasvaa lineaari-

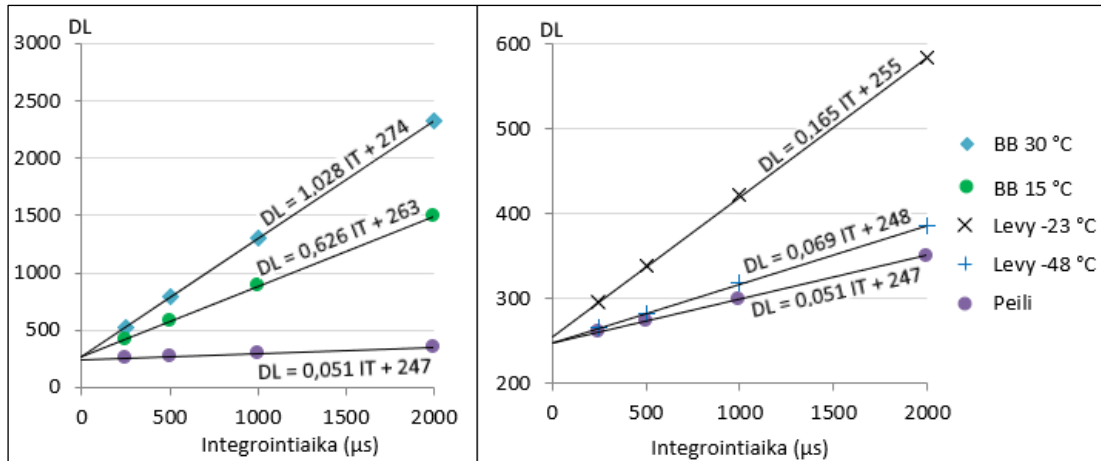
sesti integrointiajan kasvaessa. Poikkeuksena tästä tässä työssä käytetyn kameran lukukohinataso kuitenkin muuttuu lyhyillä integrointiajoilla, kuten luvussa 5.1.2 on esitetty. Lukukohinataso voidaan siis selvittää ekstrapoloimalla eri integrointiajoilla mitattujen datapisteiden perusteella.

Kuvassa 51 on esitetty lämpimällä kameralla (21,8 °C) erilämpöisistä kohteista MultiIT-toiminnon avulla neljällä eri integrointiajalla (250, 500, 1000 ja 2000 µs) mitattuja digitaalilukuarvoja. Huomion arvoista on, että kaikki käytetyt integrointiajat ovat yli 140 µs, joten luvussa 5.1.2 esitetty integrointiajan ja kameran ulostulosignaalin riippuvuuden epälineaarisuusalue ei vaikuta tuloksiin. Mittauksen aikana mitattiin aluksi normaalissa huoneenlämmössä (20 °C) koveraa kultapeiliä ja kolmea mustan kappaleen verrokkisäteilijää (30, 45 ja 60 °C). Tämän jälkeen kamera siirrettiin välittömästi pakkahuoneeseen (-23 °C), jossa mitattiin kahta kylmää mustaa alumiini-levyä (n. -23 ja -48 °C). Kameran lämpötila ei merkittävästi ehtinyt muuttua mittauksen aikana. Mittausetäisyys oli noin 10 cm, paitsi peilin tapauksessa noin 3 cm. Kaikista kohteista eri integrointiajoilla mitattuihin datapisteisiin sovitettiin suorat. Sovitesuorien vakiotermiit kuvaavat lukukohinatasoa. Kuvassa 52 on esitetty kylmällä kameralla mitatut vastaavat tulokset. Erona kylmällä kameralla suoritettujen mittauksen toteuttamisessa oli se, että mustan kappaleen verrokkisäteilijöitä oli vain 2 kpl, niiden lämpötilat olivat 15 ja 30 °C ja ne sekä kylmä kultapeili mitattiin pakkahuoneessa. MultiIT-toiminnon aiheuttamien ongelmien takia tämä mittaus suoritettiin neljässä osassa vaihtamalla integrointiaika manuaalisesti jokaisen mittauksen välillä. Näin voitiin menettellä, koska kamera ja kohteet olivat stabiloituneet ympäristöönsä.

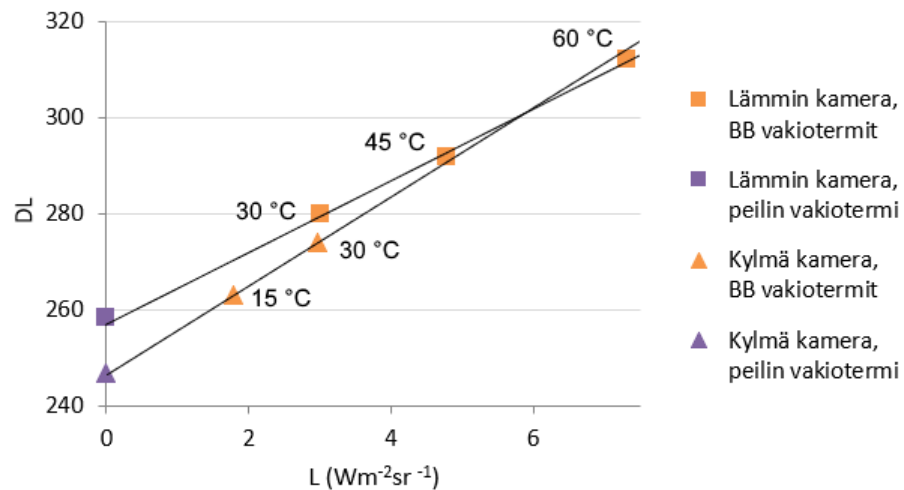
Odotetusti samoista kohteista mitattuihin datapisteisiin sovitettujen suorien kulmakertoimet ovat suurempia lämpimällä kameralla suoritetuissa mittauksissa kuin kylmällä kameralla suoritetuissa. Kulmakertoimien muutokset ovat peilin tapauksessa lukuun ottamatta likimain vakiosuuruisia, noin 0,032. Kulmakertoimen muutos johtuu pääasiassa loissäteilyn määrän muutoksesta. Peilin tapauksessa kulmakertoimen suuruuden muutos on muihin kohteisiin nähden noin 3,1-kertainen. Vastaavia tuloksia saatiin luvussa 5.2.3 esitellyistä mittauksista. Pieni osa erosta selittyy peilin itsensä korkeammalla lämpötilalla lämpimällä kameralla suoritettussa mittauksessa, kuten luvussa 5.2.2 on esitetty.



Kuva 51. Lämpimällä kameralla (21,8 °C) mitattuja tuloksia. Vasemmalla lämpimistä mustan kappaleen säteilijöistä ja oikealla kylmistä mustista alumiinilevyistä mitatut tulokset.



Kuva 52. Kylmällä kameralla (-19,8 °C) mitattuja tuloksia. Vasemmalla lämpimistä mustan kappaleen säteilijöistä ja oikealla kylmistä mustista alumiinilevyistä mitatut tulokset.



Kuva 53. Kuvassa esitetyt oranssit datapisteet ovat Kuvissa 51 ja 52 esitettyihin 15 – 60 °C:n lämpöisistä mustan kappaleen verrokkisäteilijöistä (BB) mitattuihin datapisteisiin sovitettujen suorien vakiotermejä. Niihin on sovitettu suorat. Violettiset datapisteet ovat koverasta kultapeilistä mitattuihin datapisteisiin sovitettujen suorien vakiotermit. Radianssit on määritetty laskennallisesti kaavalla 23.

Taulukko 10. Laskut, joiden avulla selvitettiin voiko kameras todellinen integrointiaika olla asetusarvosta poikkeava ja aiheuttaa Kuvissa 51 ja 52 havaittavat sovitesuorien vakiotermien muutokset. Tulosten laskemisessa on käytetty arvoja viiden numeron tarkkuudella.

Verrokkikohteen lämpötila (°C)	Lasku	Tulos (μs)	Sovitesuoran uusi vakiotermi digitaalilukuarvona
60	$(312 - 257)/2,58$	21,30	257,14
45	$(292 - 257)/1,67$	20,77	256,24
30	$(280 - 257)/1,06$	21,75	257,59
Keskiarvo		21,27	256,99

Kuvista 51 ja 52 voidaan huomata, että sovitesuorien vakiotermit ovat sitä suurempia, mitä korkeampia mitattavien kohteiden radianssit ovat. Tämä on odottamatonta, sillä integrointiajalla nolla kohinan määrän tulisi olla ulkoisesta signaalista riippumatonta. Kuvassa 53 on esitetty aiemmissa kahdessa kuvassa esitettyjen verrokkisäteilijöiden sovitesuorien vakiotermit laskennallisten radianssien mukaan ja näihin datapisteisiin on puolestaan sovitettu suorat. Radianssit on laskettu kaavalla 23 emissiivisyyden arvolla 0,98 ja ympäristön lämpötiloilla 20 ja -23 °C. Huomion arvoista on, että näiden suorien vakiotermit ja peilistä mitattuihin datapisteisiin sovitettujen suorien vakiotermit ovat likimain yhtä suuret. Tämä tulos tarkoittaa, että ainakin tällä kameralla peiliä voidaan käyttää lukukohinan todellisen tason selvittämiseen hyvällä tarkkuudella.

Mahdollinen selitys kohteen radianssin mukaan kasvavalle vakiotermit on se, että kameran integrointiaika on todellisuudessa pidempi kuin asetettu integrointiaika. Vakiotermin lineaarinen kasvu kohteen radianssin kasvaessa tukee tätä selitystä. Tämän selityksen paikkansa pitävyyttä tutkittiin lämpimällä kameralla mitattujen tulosten avulla seuraavalla tavalla: 60, 45 ja 30 °C:n lämpöisten verrokkien sovitesuorien vakiotermeistä (312, 292 ja 280) vähennettiin Kuvassa 53 esitetyn sovitesuoran vakiotermi (257). Viimeiseksi mainittu vakiotermi vastaa varsin tarkasti todellista lukukohinatasoa olettaen, että integrointiaika on todellisuudessa asetettua arvoa pidempi. Erotus jaettiin kyseisen Kuva 51 esitetyn sovitesuoran kulmakertoimella (2,58, 1,67 ja 1,06). Saatu osamäärä on integrointiaika, joka pitäisi lisätä kyseisestä kohteesta mitattuun tulokseen, jotta sovitesuoran vakiotermiksi saataisiin 257. Tulokset on esitetty Taulukossa 10. Tulosten mukaan lisäämällä asetettuun integrointiaikaan 21,27 µs sovitesuorien vakiotermeistä tulee yhtä suuret. Näin menettelemällä sovitesuorien vakiotermeistä saadaan liki main yhtä suuria, kuten niiden kuuluisikin olla. Samankaltaisia tuloksia saatiin myös suorittamalla vastaavat laskelmat useille muille mittaustuloksille. Tulokset vahvasti viittaavat siihen, että oletus asetetusta arvosta poikkeavasta integrointiajasta pitää paikkansa. Näiden tulosten perusteella voidaan todeta työssä käytetyn kameran lukukohinatason olevan digitaalilukuarvona noin 257.

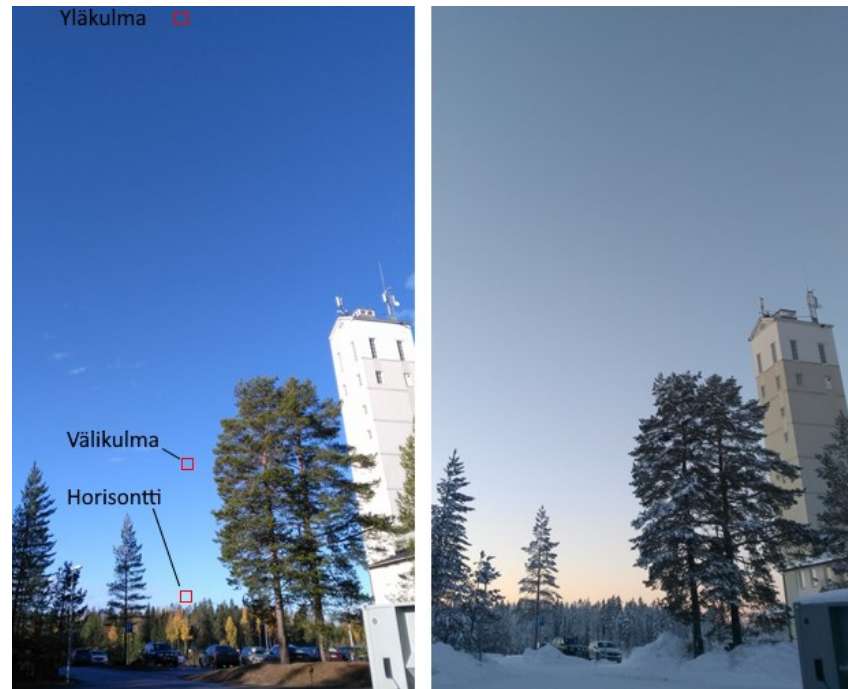
Kameran lukukohinataso määritettiin lämpimällä kameralla tunnetuista verrokkisäteilijöistä mitatuista tuloksista, vaikka kylmällä kameralla mitattuihin datapisteisiin sovitettujen suorien vakiotermit ovat merkittävästi pienempiä. Lämpimällä kameralla mitatut tulokset on mitattu samassa mittauksessa, joten eri integrointiajoilla mitatut datapisteet ovat keskenään varmasti täysin vertailukelpoisia. Merkille pantavaa on, että osa Taulukossa 8 esitettyjen sovitesuorien vakiotermeistä on huomattavasti pienempiä kuin juuri määritetty lukukohinataso. Todennäköisin syy tälle on se, että verrokkisäteilijöiden pintalämpötila poikkeaa hieman asetusarvosta, sillä niitä ei ole suunniteltu toimimaan pakkasolosuhteissa.

5.3 Absoluuttisen taivastaustan määrittäminen kenttäolosuhteissa

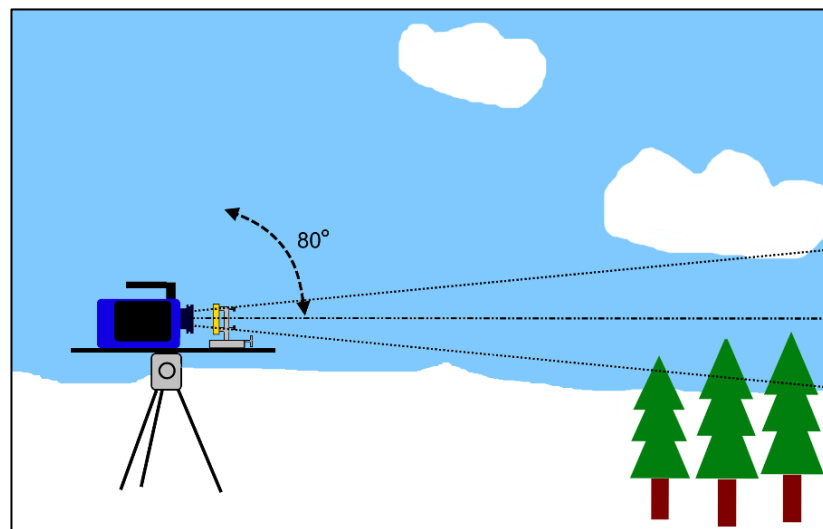
Työn kokeellisessa vaiheessa suoritettiin mittauksia taivastaustasta. Mittauksia suoritettiin syksyllä ja talvella vaihtelevissa olosuhteissa. Erityisen kiinnostuksen kohde oli pilvetön taivas kovalla pakkasella, sillä sen emittoiman säteilyn voimakkuus on hyvin matala ja täten sen absoluuttista radianssia on erityisen hankala määrittää kohtuullisella tarkkuudella. Mittausten avulla selvitetiin erityisesti koveran kultapeilin soveltuvuutta absoluuttisten arvojen määrittämiseen. Lisäksi mittausten yhtenä motivaationa oli kerätä tietoa taivastaustan radianssin voimakkuudesta eri olosuhteissa. Tässä luvussa esitellään keskeisimpiä mittaustuloksia. Ympäristön olosuhteita seurattiin Oregon WMR89 sääasemalla, jolla voitiin mitata mm. (maanpinnan tason) lämpötilaa, ilman kosteutta, ilmanpainetta ja sademäärää. Hiilidioksidin pitoisuutta ei mitattu.

Taivasmittaukset suoritettiin aina PVTUTKL:n parkkipaikan ja Parosjärven yli atsimuuttisuuntaan 305° , eli hieman luoteesta (315°) lännen (270°) suuntaan. Kuvattu maisema on esitetty Kuvassa 54. Puuston latvuston raja oli kameran tasosta noin $3,5^\circ$ ylöspäin. Etäisyys puuston reunaan oli noin 350 m. Kamera oli asennettu Kuvissa 32 ja 33 esitetyille noin sentin paksuiselle alumiinilevylle koveran kultapeilin ja NUCissa tarvittavan korkeaaemissiivisellä teipillä päällystetyn solumuovin palan kanssa. Alumiinilevyn pohjaan oli kiinnitetty kolmijalka, jonka päällä kamera pääsi kääntymään noin 80° vertikaalisessa suunnassa. Levyn päälle pystytettiin nopeasti asentamaan kate, joka suojasi kameraa esimerkiksi lumisateelta ja kevyeltä sateelta. Tämä oli tärkeää, jotta kamera pystyttäisiin pitämään ulkona pitkiä aikoja epävakaisissa säissä. Jos kamera jouduttaisiin viemään sisätiloihin mittausten välillä, sen lämpötila muuttuisi, mikä vaikuttaisi merkittävästi mittaustuloksiin. Mittausjärjestelyä on havainnollistettu Kuvassa 55.

Tyypillisessä mittauksessa kameran annettiin stabiloitua ennen mittauksen aloittamista ja juuri ennen mittausta suoritettiin yhden pisteen NUC. Tämän jälkeen linssiin eteen asetetusta tasalämpöisestä solumuovin palasta suoritettiin verrokkimittaus, jota tarvitaan suhteellisten radianssien määrittämiseen FDRA_radiance_viewer-MATLAB-funktiolla. Myös varsinaisen mittauksen alussa ja lopussa kuvattiin samaa tasalämpöistä solumuovia, jotta tarvittaessa voitaisiin paremmin arvioida, onko jokin parametri muuttunut mittauksen aikana. Peili oli noin 3 cm etäisyydellä kameran linssistä. Tällä peilin ja linssin välisellä etäisyydellä ilmaisimesta saatiin tarkka kuva, kun kamera oli tarkennettu 350 m etäisyydelle. Mittauksen alussa peiliä kuvattiin pari sekuntia, minkä jälkeen se siirrettiin kiskoa pitkin syrjään. Aluksi kuvattiin tasoa, jossa puuraja oli juuri kuvan keskikohdan alapuolella (horisontti, vertikaalikulma $3,5^\circ$). Tämän jälkeen kameraa käännettiin hitaasti aina noin 80° kulmaan (yläkulma), jossa sitä pidettiin muutaman sekunnin ajan. Sen jälkeen kamera käännettiin hitaasti takaisin lähtötasoon, jota kuvattiin pari sekuntia. Sitten peili siirrettiin takaisin kameran eteen. Käytetty kuvaustaajuus oli tyypillisesti joko 10 tai 20 Hz ja MultiIT-toiminnolla mitatessa noin 50 Hz.



Kuva 54. Taivasmittauksissa kuvattu maisema syksyllä ja talvella. Kuvaan on karkeasti merkitty kohdat, joista taivaan signaalit on mitattu.



Kuva 55. Havainnollistus taivasmittauksista. Kameraa käännettiin vertikaalisuunnassa noin 80° .

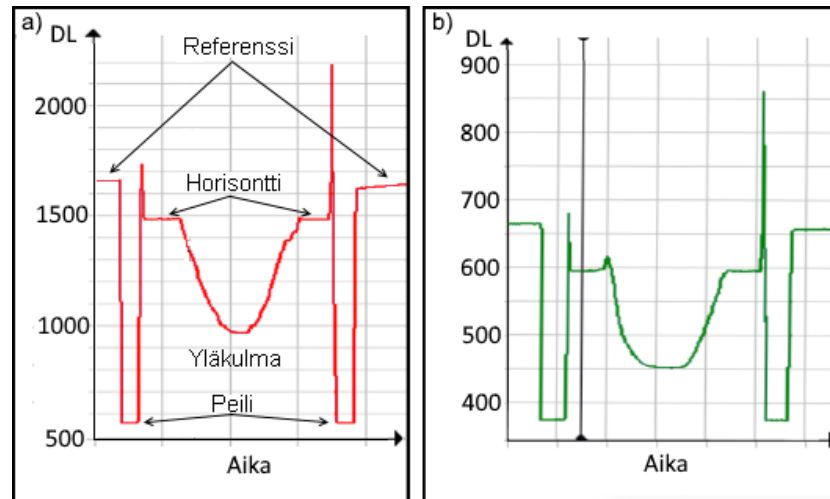
Kuvassa 56 on esitetty yhden taivasmittauksen alussa horisontista kuvattu maisema. Kuva on otettu pilvettömällä säällä 21.1.2019 klo 16.00 auringon juuri laskiessa. Kuvasta voidaan havaita mm. puiden latvojen olevan vielä lämpimät auringon lämmitettyä niitä. Pikseleiden värien tummumisesta voidaan päätellä taivaan herätteen pienenevän mittauskulman kasvaessa. Kuvassa 57 on esitetty kaksissa eri olosuhteissa taivaalta mitattuja digitaalilukuarvoja. Kuvassa 57 a on esitetty 12.10.2018 klo 12.30 liki pilvettömällä säällä mitatut tulokset. Mittauksen aikaiset olosuhteet olivat: lämpötila 11°C , ilmankosteus 89 %, ilmanpaine 1026 mbar ja kamerasen lämpötila $21,2^\circ\text{C}$. Kuvassa 57 b on esitetty tuloksia Kuvan 56 mittauksesta, joka suoritettiin lämpötilassa $-18,2^\circ\text{C}$, ilmankosteudessa 80 % ja ilmanpaineessa 1015 mbar. Kamerasen rungon lämpötila oli -

13,8 °C. Digitaalilukuarvot on määritetty kuvassa näkyvän sinisen neliön alueella olevien pikseleiden keskiarvona. Musta pystyviiva kuvaa videon hetkeä, jona Kuva 56 on otettu. Lokakuussa suoritettun mittauksen verrattain korkea kameras rungon lämpötila selittyy sillä, ettei kamera ole ehtinyt stabiloitumaan ympäristöönsä ennen mittausta. Tämä kasvattaa signaalin nollatasoa etenkin peilin tapauksessa. Syy nollatason kasvuun on loissäteilyn voimakkuuden kasvu.

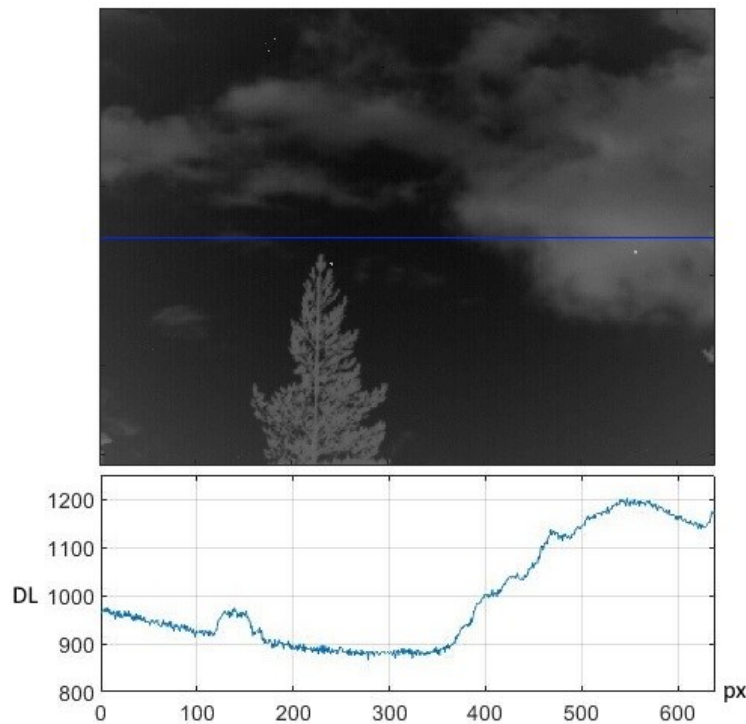
Mittausten alussa on kuvattu verrokkina solumuovin palaa, minkä jälkeen on kuvattu koveraa kultapeiliä. Peilistä mitatut digitaalilukuarvot ovat hyvin matalia. Tämän jälkeen peili siirrettiin pois edestä. Mittausten yksittäiset korkeat piikit johtuvat kameras lämpimästä rungosta peräisin olevasta säteilystä, joka on peiliä siirrettäessä hetkellisesti heijastunut suoraan ilmaisimelle. Tämän jälkeen on kuvattu juuri puuston latvuston yläpuolista horisonttia (vertikaalikulma 3,5°) ja käännetty kameraa tasaisella nopeudella noin 80° ylöspäin (yläkulma) ja samat vaiheet on toistettu. Pieni piikki oikean puoleisessa kuvaajassa mustan viivan oikealla puolella johtuu luultavasti siitä, että kamera on hetkellisesti kääntynyt kuvaamaan latvustoa, kun sitä on alettu kääntämään. Taivaasta mitatut digitaalilukuarvot pienenevät kuvattaessa taivasta suuremmalla vertikaalisella kulmalla ja tulokset olivat saman kaltaisia jokaisella suoritettulla mittauksella elleivät paikalliset pilvet vaikuttaneet tuloksiin. Tämä johtuu siitä, että ilmakehän lämpötila laskee korkeuden kasvaessa ja mitattaessa matalalla kulmalla taivasta suurempi osa signaalista syntyy ilmakehän lämpimämmissä osissa. Tuloksissa olennaista on, että kummassakin tapauksessa koverasta kultapeilistä on mitattu paljon pienemmät digitaalilukuarvot kuin taivaasta. Odotetusti kylmällä kameralla kylmissä olosuhteissa mitatut digitaalilukuarvot olivat paljon pienempiä kuin lämpimämmällä kameralla lämpimämmissä olosuhteissa mitatut arvot, myös kultapeilin tapauksessa. Kylmällä kameralla kylmästä taivaasta yläkulmalla mitatut arvot (n. 450) ovat kuitenkin pienempiä kuin lämpimällä kameralla kultapeilistä mitatut arvot (n. 570). On muistettava, että lokakuun mittauksessa kamera oli verrattain lämmin, sillä se ei ollut ehtinyt stabiloitua ympäristöönsä ennen mittausta.



Kuva 56. Yksi kuva tammikuussa kylmänä kirkkaana pakkaspäivänä infrapunakameralla kuvattua videosta. Sinisestä neliöstä määritetyt digitaalilukuarvot koko videon ajalta on esitetty Kuvassa 57 b.



Kuva 57. Taivaalta mitattuja digitaalilukuarvoja eri olosuhteissa. a) $T_{\text{ympäristö}} = +11\text{ }^{\circ}\text{C}$, ilmankosteus = 89 %, liki pilvetön taivas, $T_{\text{kamera}} = 21,2\text{ }^{\circ}\text{C}$; b) $T_{\text{ympäristö}} = -18,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, ilmankosteus = 80 %, pilvetön taivas, $T_{\text{kamera}} = -13,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mitattujen digitaalilukuarvojen profiilit ovat hyvin samankaltaiset. Oikealla olevan kuvan musta pystyviiva osoittaa videon hetken, jolloin Kuva 56 on otettu.



Kuva 58. Pilvien vaikutus signaalin voimakkuuteen. Mittaus on suoritettu lokakuun lopussa ilta-päivällä. $T_{\text{ympäristö}} = 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, RH 83 %.

Pilvien vaikutusta taivaalta mitattuihin digitaalilukuarvoihin on havainnollistettu Kuvassa 58. Kuva on otettu ympäristön lämpötilassa $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kuvasta nähdään, että pilvet vaikuttavat taivaan herätteeseen hyvin voimakkaasti. Kuvassa esitettyjen tulosten mukaan pilvet voivat nostaa taivaalta mitattua digitaalilukuarvoa yli 300 yksikköä, joka vastaa noin $0,43\text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$:n kasvua taivaan radianssissa. Mikäli taivastaustan lämpötila on $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, tämän suuruinen radianssin kasvu vastaa noin $8\text{ }^{\circ}\text{C}$:n kasvua lämpötilassa. Pilvien korkeus ja ominaisuudet vaikuttavat huomattavasti

siihen millainen signaali niistä saadaan mitattua, kuten mm. Liuon teoksessa *Introduction to atmospheric radiation* sekä Shaw'n ja Fedorin artikkelissa *Improved calibration of infrared radiometers for cloud temperature remote sensing* on esitetty. [14, s. 155; 39]

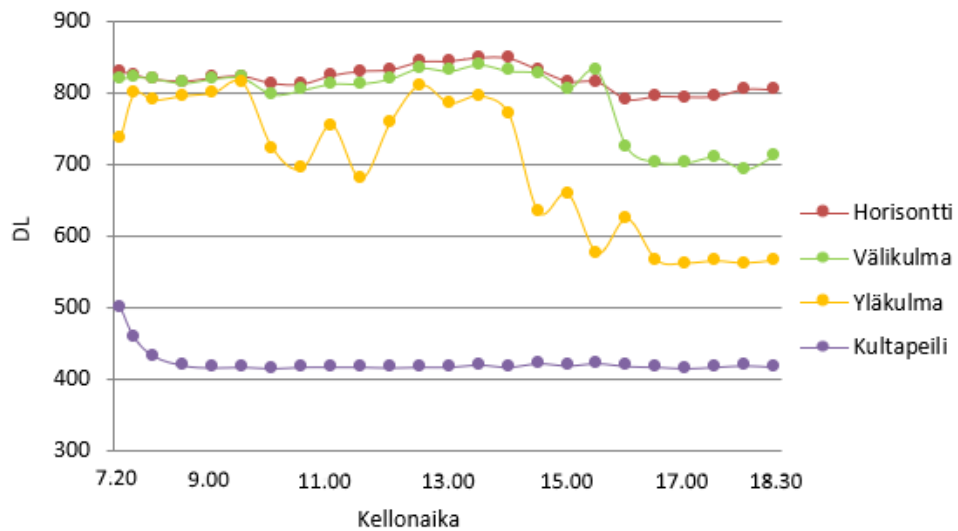
Työn kokeellisessa vaiheessa suoritettiin taivasmittauksia mittaussarjoina, jotka jatkuivat pisimmillään aamusta iltaan. Kuvissa 59 ja 60 on esitetty 28.11.2018 suoritetun ja Kuvissa 62 ja 63 21.1.2019 suoritetun mittaussarjan tulokset. Kuvissa 59 ja 62 tulokset on esitetty digitaalilukuarvoina ja Kuvissa 60 ja 63 absoluuttisina radianssin arvoina. Ne on määritetty koveraa kultapeiliä hyödyntävällä menetelmällä. Absoluuttisia radianssin arvoja määritettäessä on aluksi FDRA_radiance_viewer-MATLAB-funktiolla määritetty digitaalilukuarvoista radianssit suhteellisina arvoina tasalämpöisen verrokin suhteen. Funktio käyttää radianssin laskemiseen aiempien kalibroitimittausten perusteella määritettyjä kalibroitimittauksia. Taivaan suhteellisista radianssin arvoista on laskettu absoluuttiset arvot vähentämällä niistä samassa mittauksessa koverasta kultapeilistä määritetty suhteellinen radianssin arvo. Peilistä määritettyä signaalia käytettiin siis arvioimaan lukukohinasta, pimeävirrasta ja loissäteilystä muodostuvaa signaalin nollatasoa. Peilistä mitatut arvot ovat aina todellisista nollatasoa korkeampia, kuten edellisissä luvuissa on osoitettu. Täten peilin avulla kohteista määritetyt absoluuttiset radianssin arvot ovat aina pienempiä kuin niiden todelliset radianssit.

Kuvissa 61 ja 64 on esitetty kameran rungon ja ympäristön lämpötilat aiemmin mainittujen mittausten aikana. Ennen marraskuun mittaussarjan ensimmäistä mittausta kamera oli ollut ulkona viileässä vain noin 25 minuuttia, joten se ei ollut ehtinyt stabiloitumaan. Tämä on selkeästi havaittavissa Kuvassa 61 kameran rungon lämpötilan laskuna mittaussarjan alussa. Kameran rungon lämpötilan lievä nousu noin klo 13.00 johtunee auringonpaisteesta. Ennen tammikuun mittaussarjan ensimmäistä mittausta kamera oli likimain ehtinyt stabiloitumaan ympäristöönsä. Ensimmäisen ja toisen datapisteen välillä kamera kuitenkin jäähdyi vielä hieman. Kuvasta 64 voi huomata kameran rungon lämpötilan vaihtelevan ympäristön lämpötilan mukana. Pakkashuoneessa suoritettujen mittausten tapaan kamera stabiloituu kylmissä olosuhteissa lämpötilaan, joka on noin 5 °C ympäristön lämpötilaa korkeampi.

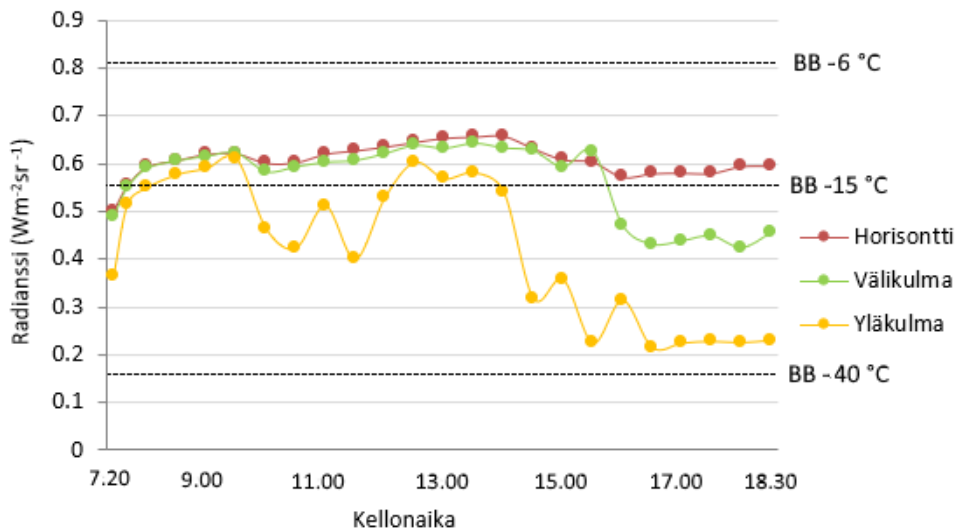
Kuvasta 59 on mittaussarjan alussa peilistä mitatuista arvoista havaittavissa selkeä pienentyvä trendi, joka korreloi vahvasti kameran rungon lämpötilan kanssa. Lisäksi Kuvissa 59 ja 60 esitettyjen taivaalta mitattujen tulosten välillä on huomattavissa selkeitä eroja juurikin alkupään datapisteissä. Nämä erot johtuvat kohteen herätteeseen summautuvasta loissäteilystä, jonka voimakkuus kasvaa kameran rungon lämpötilan kasvaessa. Kuten luvussa 5.2.3 esitettiin, peilistä mitatun digitaalilukuarvon suuruus riippuu kameran rungon lämpötilasta voimakkaammin kuin kohteesta mitatun digitaalilukuarvon suuruus. Kuvassa 59 esitettyjen digitaalilukuarvojen tapauksessa tämä tarkoittaa, että ensimmäisten neljän datapisteen taivaasta peräisin olevan signaalin osuus on pienempi verrattuna myöhempisiin datapisteisiin.

Kameran korkean lämpötilan takia Kuvan 60 neljän ensimmäisen datapisteen absoluuttiset radianssin arvot ovat myöhempiin arvoihin verrattuna merkittävästi pienempiä. Syynä tähän on se, että taivaalta mitatuista suhteellisista radianssin arvoista vähennetyt peilistä mitatut suhteelliset arvot ovat korostuneesta loissäteilyn vaikutuksesta suhteellisesti suurempia. Voidaan siis

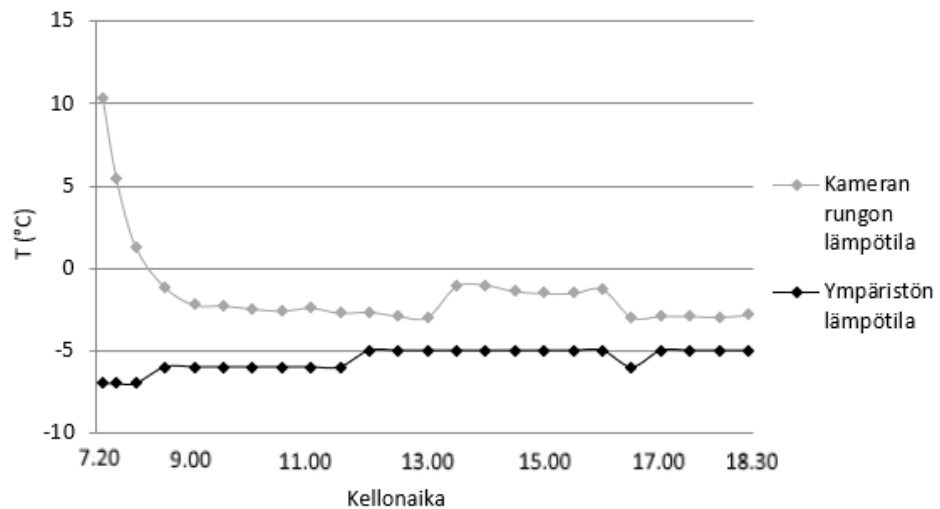
todeta, että kameran lämpötilan muutoksen takia alkupään mittausten ensimmäiset neljä datapistettä ovat suhteessa myöhempiin datapisteisiin digitaalilukuarvojen tapauksessa liian suuria ja absoluuttisten radianssien tapauksessa liian pieniä. Kameran lämpötila on vaihdellut hieman myös muiden mittausten datapisteiden välillä, joten niidenkin tapauksessa loissäteilystä ja kohteesta peräisin olevasta säteilystä syntyneiden ulostulosignaalin komponenttien suhteet vaihtelevat hieman, eivät kuitenkaan merkittävästi.



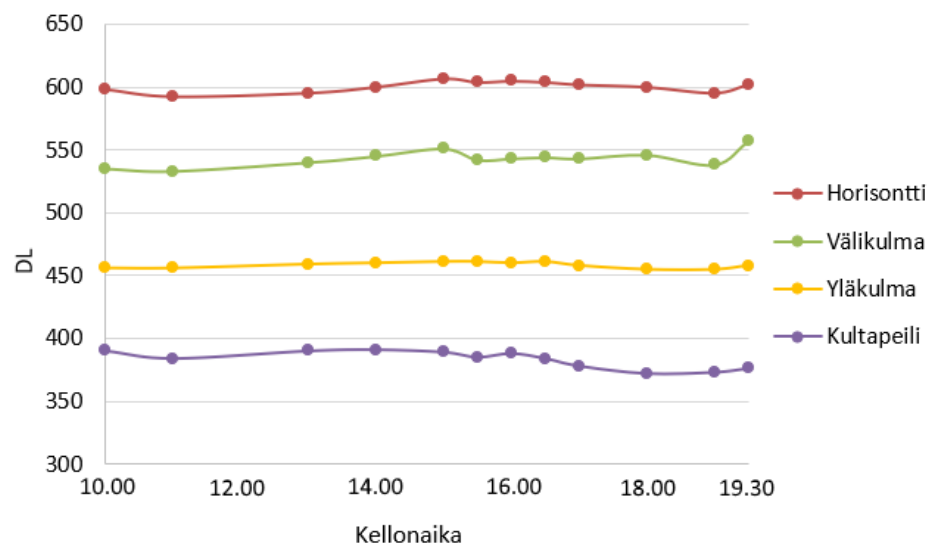
Kuva 59. 28.11.2018 hyvin pilvisenä päivänä (noin -6°C) taivaalta mitatut digitaalilukuarvot. Yläkulmalla mitattujen digitaalilukuarvojen suuri vaihtelu johtuu pääasiassa pilvistä.



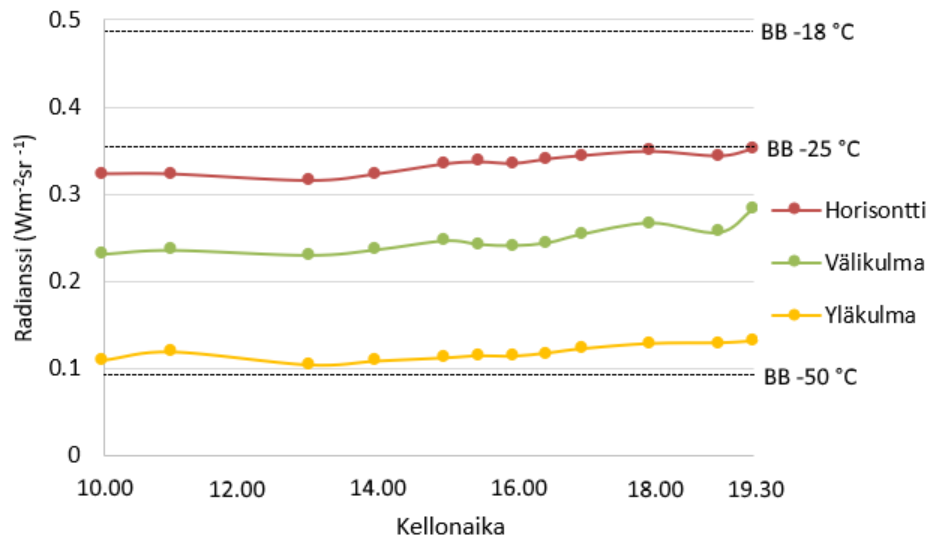
Kuva 60. 28.11.2018 hyvin pilvisenä päivänä (noin -6°C) taivaalta mitatut absoluuttiset radianssin arvot. Absoluuttiset arvot on määritetty käyttämällä koverasta kultapeilistä mitattua arvoa nolatasona. Osa vaihteluista johtuu pilvistä. Kuvaan on merkitty vertailun vuoksi myös -6°C , -15°C ja -40°C :n lämpöisten mustan kappaleen säteilijöiden (BB) kameran vastealueella emittoimat radianssit.



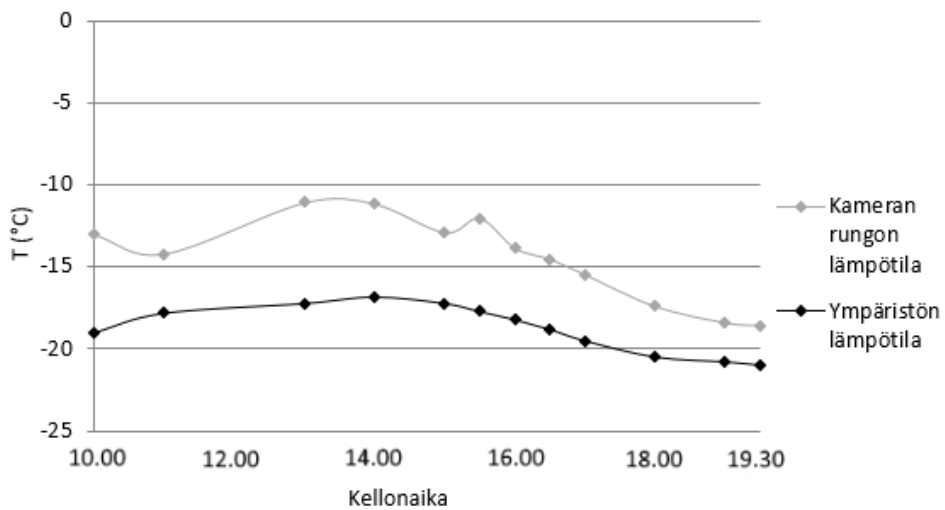
Kuva 61. Kameran rungon ja ympäristön lämpötilat 28.11.2018 suoritettujen mittausten aikana. Kameran rungon lämpötila selvästi korreloi Kuvassa 59 esitettyjen kultapeilistä mitattujen digitaalilukuarvojen kanssa.



Kuva 62. 21.01.2019 kylmänä liki pilvettömänä pakkaspäivänä (noin -18°C) taivaalta mitatut digitaalilukuarvot.



Kuva 63. 21.01.2019 kylmänä pääasiassa pilvettömänä pakkaspäivänä (noin -18 °C) taivaalta määritetyt absoluuttiset radianssin arvot. Absoluuttiset arvot on määritetty käyttämällä koverasta kultapeilistä mitattua arvoa nollatasona. Kuvaan on merkitty vertailun vuoksi myös -18, -25 ja -50 °C:n lämpöisten mustan kappaleen säteilijöiden (BB) kameran vastealueella emittoimat radianssit.



Kuva 64. Kameran rungon ja ympäristön lämpötilat 21.01.2019 suoritettujen mittausten aikana.

Kuviin 60 ja 63 on vertailun vuoksi merkitty näkyviin laskennallisesti määritettyjä mustan kappaleen säteilijöiden kameran vastealueella emittoimia radianseja. Mittaustulosten perusteella matalillakin vertikaalikulmilla mitattuna taivaan radianssi on merkittävästi matalampi kuin ympäristön lämpöisen mustan kappaleen säteilijän radianssi. Suuremmalla vertikaalikulmalla taivaalta mitatut arvot taas ovat siihen verrattuna pääasiassa paljon pienempiä. Kuten Kuvasta 63 nähdään, on esimerkiksi klo 19.00 -21 °C:n ympäristön lämpötilassa kylmällä kameralla taivaalta määritetty horisontin tasalta (3,5°) noin 0,344 Wm⁻²sr⁻¹, välikulmasta (n. 20°) 0,257 Wm⁻²sr⁻¹ ja yläkulmasta (n. 80°) 0,130 Wm⁻²sr⁻¹ radianssin arvoja. Ero horisontin tasalta ja liki pystysuoraan taivaalta mitattujen radianssin arvojen välillä on siis noin 0,214 Wm⁻²sr⁻¹, mikä vastaa ympäristön

lämpöisen mustan kappaleen säteilijän lämpötilan laskemista noin 14 °C:lla. Kuvassa 60 esitettyjen tulosten tapauksessa ympäristön lämpötilassa -5 °C (klo 18.30) vastaava muutos on $0,37 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$, mikä myös vastaa ympäristön lämpöisen mustan kappaleen säteilijän lämpötilan laskemista noin 14 °C:lla.

Poikkeuksen suurista eroista eri vertikaalikulmilla mitatuista radianssin arvoista tekevät sellaiset Kuvassa 60 esitetyt datapisteet, jotka on mitattu taivaan ollessa matalalla olevien pilvien peitossa (noin klo 9 ja 13). Näissä tapauksissa ylempää taivaalta mitatut radianssit ovat vain hieman pienempiä kuin horisontin tasalta mitatut radianssit. Eroa radianssissa on vain noin $0,05 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$, mikä vastaa ympäristön lämpöisen mustan kappaleen säteilijän lämpötilan laskemista noin 1,5 °C:lla.

6. TUTKIMUSTULOSTEN ANALYSOINTI

Tässä luvussa analysoidaan edellisessä luvussa esiteltyjä mittaustuloksia ja sekä esitetään ehdotuksia jatkotutkimuksille. Erityisesti keskitytään arvioimaan mittaustarkkuutta: kuinka tarkasti mitattavien kohteiden tai taustan radianssien absoluuttiset arvot kyetään määrittämään arvioimalla signaalin nollatasoa koveran kultapeiliä hyödyntävän menetelmän avulla.

Kirjallisuudesta ei löytynyt tapauksia, joissa signaalin nollatasoa olisi yritetty selvittää mittaamalla jäähdytetyllä infrapunakameralla peilin kautta kameran omaa erittäin kylmää ilmaisinta. Ympäristön vaikutusten arvioiminen perustui joko mittauksia ennen vaihtelevissa olosuhteissa suoritettuihin kalibrointimittauksiin tai tunnetun verrokin mittaamiseen mittauksen yhteydessä.

6.1 Mittaustarkkuuden arviointi määritettäessä absoluuttisia radiansseja koveran peilin avulla

Tässä työssä esitettyjen mittaustulosten perusteella on haastavaa määrittää mittaustarkkuutta määritettäessä kohteiden radianssin absoluuttisia arvoja koveran kultapeilin avulla kameran eri lämpötiloilla. Syynä tähän on tulosten vaihtelevuus, mikäli kamera ei ole ollut stabiloitunut ympäristöönsä. Esimerkiksi pakkahuoneessa suoritettussa mittauksessa, jonka tuloksia on esitetty Kuvassa 49, kameran rungon lämpötilalla 15,5 °C viileästä peilistä on määritetty digitaalilukuarvo 546. Puolestaan mittauksessa, jonka tuloksia on esitetty Kuvassa 47, korkeammalla kameran rungon lämpötilalla 21,7 °C:n lämpimästä peilistä on määritetty digitaalilukuarvo 525. Tämä vahvistaa myös sitä havaintoa, että varsin laajasti käytetty kameran rungon mitatun lämpötilan ja/tai syötetyn ympäristön lämpötilan perusteella laskennallisesti toteutettu olosuhteiden vaikutusten kompensointi ei ole luotettava tapa mitata kohteiden absoluuttisia radiansseja kenttäolosuhteissa.

Merkittävin mittaustarkkuuteen vaikuttava tekijä on kameran lämpötila. Myös kultapeilin lämpötilalla on merkitystä, mutta vain noin 10 % kameran lämpötilan vaikutuksesta. Peilin lämpötilan muuttuminen useamman kymmenen asteen verran aiheutti peilistä mitattuun digitaalilukuarvoon noin 20 yksikön muutoksen, joka vastaa noin $0,03 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$:n muutosta radianssissa. Yhtä suuret kameran lämpötilan muutokset puolestaan aiheuttavat peilistä mitattuun digitaalilukuarvoon noin 200 yksikön muutoksen, joka vastaa noin $0,29 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$:n muutosta radianssissa. Keskeistä on, että kameran lämpötila vaikuttaa peilistä mitattujen digitaalilukuarvojen suuruuteen paljon voimakkaammin kuin kohteesta mitattujen digitaalilukuarvojen suuruuteen. Syynä tähän on loissäteilyn määrän kasvu kamerasta peräisin olevan säteilyn heijastuessa peilin kautta ilmaisimelle. Mittaustulosten perusteella kameran lämpötilan muutoksen vaikutus peilistä mitattuihin arvoihin on suuruusluokaltaan noin kolminkertainen verrattuna kohteesta mitattuihin arvoihin. Peiliä mitattaessa loissäteilyn määrä on siis paljon suurempi kuin kohdetta tai taustaa mitattaessa, joten sen avulla ei voida tarkasti arvioida loissäteilyn määrää mitattaessa kohdetta tai taustaa.

Taulukko 11. Kahdella kameran rungon lämpötilalla peilistä ja kohteesta mitattuja digitaalilukuarvoja.

Kameran lämpötila	- 48 °C:n lämpöisen levyn radianssia vastaava DL	- 48 °C:n lämpöisestä levystä mitattu DL	Koverasta kulta-peilistä mitattu DL
-19,8 °C	83	386	350
21,8 °C	83	464	561

Mittausvirhettä, joka aiheutuu koverasta kultapeilistä mitatun signaalin käyttämisestä signaalin nollatasona, voidaan kuitenkin karkeasti arvioida. Luotettavimmin mittausvirheen suuruutta voidaan arvioida stabiileissa olosuhteissa mitattujen tulosten perusteella. Mittaustarkkuutta arvioidaan analysoimalla kylmällä ja lämpimällä kameralla peilistä sekä -48 °C:n lämpöisestä mustaksi maalatusa alumiinilevystä mitattuja kameran ulostulosignaalin arvoja. Mittauksen tulokset on esitetty Taulukossa 11 (sekä Kuvassa 45). Arviointiin käytetään matalaerähteisintä kohdetta, koska tällöin mahdolliset pienet muutokset kohteen herätteessä tai epätarkkuudet kameran vasteessa vaikuttavat tuloksiin vähiten. Luvussa 5 esitettyjen tulosten mukaisesti kameran ulostulosignaalin lukukohinataso on digitaalilukuarvoina noin 257 ja $1 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ radianssin muutos kohteen herätteessä vastaa digitaalilukuarvon muutosta noin 700 yksiköllä. Tässä arvioinnissa oletetaan kameran herkkyyden pysyneen muuttumattomana.

Stabiloituneella -19,8 °C:n lämpöisellä kameralla on mitattu -48 °C:n lämpöisestä mustaksi maalatusa alumiinilevystä digitaalilukuarvo 386 ja kylmästä kultapeilistä arvo 350. Kaavan 23 mukaisesti laskettuna (emissiivisyydellä 0,95 ja ympäristön lämpötilalla -23 °C) levyn radianssi kameran vastealueella on $0,118 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$. $0,118 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$:n muutos radianssissa vastaa noin $(0,118/700 =)$ 83 yksikön muutosta digitaalilukuarvossa. Jos levystä mitatusta digitaalilukuarvosta vähennetään lukukohinan ja levyn radianssin aiheuttamat osuudet signaalista, saadaan määritettyä loissäteilyn ja pimeävirran osuus: $386 - 257 - 83 = 46$. Vähennettäessä peilistä mitatusta digitaalilukuarvosta lukukohina, saadaan loissäteilystä, pimeävirrasta ja peilistä aiheutuneen signaalin osaksi $350 - 257 = 93$. Vähentämällä tästä luvusta normaalia kohdetta mitattaessa signaaliin summautuvien pimeävirran ja loissäteilyn osuus, saadaan mittausvirhe määritettäessä signaalin nollataso peilistä mitatun signaalin perusteella. Virheen suuruus on digitaalilukuarvoina: $93 - 46 = 47$. Se vastaa noin $0,067 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$:n muutosta radianssissa tai -48 °C:n lämpöisen mustan kappaleen säteilijän lämpötilan kasvua 9 °C:lla. Virhe johtuu peilin emissiosta sekä erityisesti peilin kautta ilmaisimelle heijastuneesta loissäteilystä.

Lämpimällä kameralla suoritettussa mittauksessa levystä mitattu digitaalilukuarvo oli 464, joka on 78 yksikköä korkeampi kuin kylmällä kameralla mitattu vastaava arvo. Koska mittaus on suoritettu samoissa olosuhteissa samasta kohteesta, muutoksen voidaan arvioida johtuneen kokonaisuudessaan kameran lämpötilan muutoksesta seuranneesta loissäteilyn voimakkuuden muutoksesta. Levystä mitatusta digitaalilukuarvosta arviolta siis $46 + 78 = 124$ yksikköä koostuu loissäteilyn ja pimeävirran vaikutuksesta. Se vastaa radianssin muutosta $0,18 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$:lla tai -48 °C:n lämpöisen mustan kappaleen säteilijän lämpötilan kasvua noin 18 °C:lla

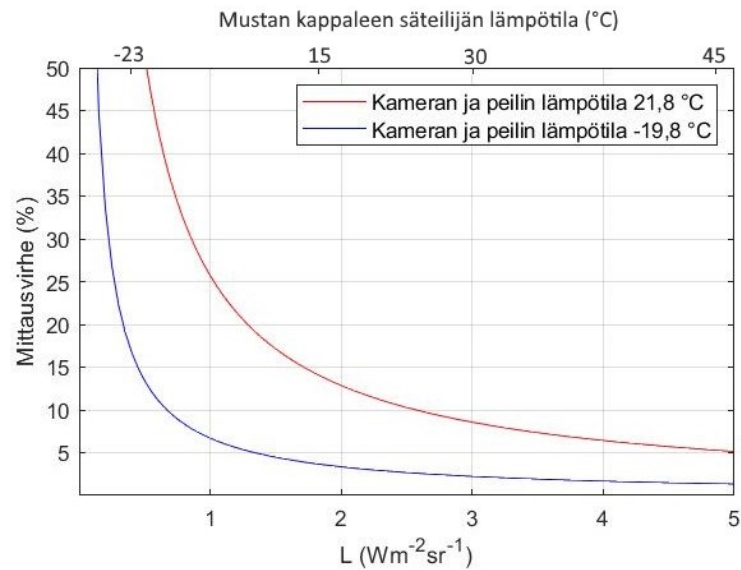
Peilistä lämpimällä kameralla mitattu digitaalilukuarvo on 561. Se on 211 yksikköä korkeampi kuin kylmällä kameralla mitattu vastaava arvo. Pieni osa, arviolta noin 20 yksikköä, tästä digitaalilukuarvon muutoksesta johtuu peilin lämpötilan muutoksesta, sillä peili oli huoneenlämpöinen (20 °C) lämpimällä kameralla suoritettussa mittauksessa ja pakkahuoneen lämpöinen (-23 °C) kylmällä kameralla suoritettussa mittauksessa. Peilistä mitatusta digitaalilukuarvosta 561 siis nollatasosta poikkeavaa virhettä on noin $561 - 257 - 124 = 180$ yksikköä. Se vastaa noin $0,26 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$:n muutosta radianssissa tai -48 °C:n lämpöisen mustan kappaleen säteilijän lämpötilan kasvua noin 24 °C:lla.

Kuvassa 65 on esitetty mittausvirhe, joka syntyy määritettäessä kohteista absoluuttisia radianssin arvoja käyttämällä koverasta kultapeilistä mitattua signaalia nollatasona. Se on paras arvio, joka tässä työssä mitattujen tulosten perusteella kyettiin varsin luotettavasti muodostamaan. On huomioitava, että virheen määrä ei kasva lineaarisesti kameran lämpötilan noustessa, sillä Kuvan 29 mukaisesti kameran säteilemän loissäteilyn voimakkuus kasvaa eksponentiaalisesti. Tämä tarkoittaa, että esimerkiksi kameran lämpötilalla 0 °C virheen suuruus on lähempänä virheen suuruutta -19,8 °C:n kuin 21,8 °C:n lämpöisellä kameralla mitattaessa.

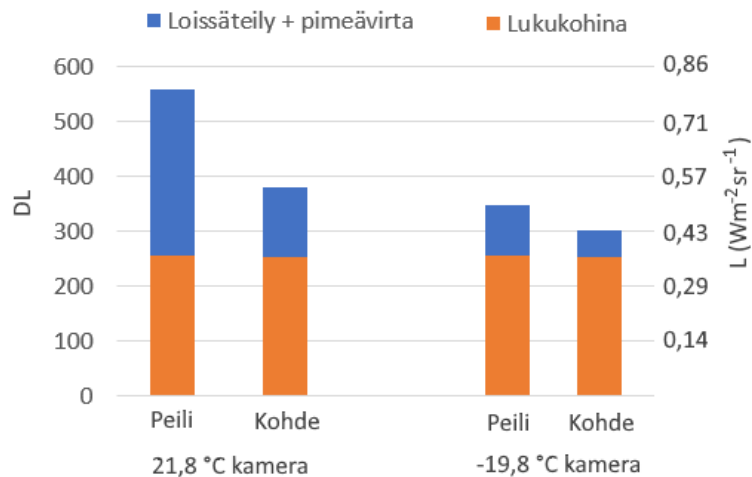
Kohdetta mitattaessa loissäteilyn ja pimeävirran yhteenlaskettu määrä on siis kasvanut noin $(78 / [46 + 78] =) 63 \%$ kameran lämmentyä noin 42 °C. Tämä tulos vastaa varsin hyvin Jainin ja Biswasin artikkelissaan esittelemiä tuloksia loissäteilyn ja kameran lämpötilan välisestä yhteydestä jäähdytetyssä LWIR-kaistan kamerassa [21, s. 196]. Kuvassa 66 on esitetty arviot lukukohinasta sekä pimeävirrasta ja loissäteilystä aiheutuvista komponenteista mitattaessa peiliä tai kohdetta.

Pimeävirran osuuden voidaan arvioida olevan vähäinen, mutta sen määrää on hyvin hankala arvioida tarkasti. Kontrolloiduista verrokkilähteistä mitattujen datapisteiden perusteella kohtaan radianssin nollakohtaan ekstrapoloimalla ei päästä riittävän luotettaviin tuloksiin. Kuitenkin, -20 °C:n lämpöinen kappale säteilee MWIR-kaistalla noin 78 % vähemmän kuin 20 °C:n lämpöinen kappale. Tämän perusteella voidaan karkeasti arvioida pimeävirran vaikutuksen olevan pienempi kuin loissäteilyn -19,8 °C:n lämpöisen kameran tapauksessa. Tämä tarkoittaa, että pimeävirran vaikutus on digitaalilukuarvoina alle 23 ja radianssina alle $0,033 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$.

Peilin heijastuksista johtuva loissäteilyn suhteellisen osuuden kasvu aiheuttaa erittäin merkittävää mittausvirhettä määritettäessä signaalin nollatasoa peilin avulla. Absoluuttinen mittausvirhe on sitä suurempi, mitä korkeampi kameran rungon lämpötila on. Mittausvirheen takia tällä menetelmällä määritetyt kohteen radianssin arvot ovat todellisia radiansseja pienempiä. Peilistä mitatussa signaalissa loissäteilyn määrä on selkeästi yli kaksinkertainen verrattuna kohteesta mitattuun signaaliin. Täten tarkempia absoluuttisia arvoja saataisiin esimerkiksi, jos nollatasona käytettäisiin peilistä mitatun signaalin sijaan lukukohinatasoa. Tämä tarkoittaa, että signaalin nollatason määrittäminen koveraa kultapeiliä mittaamalla ei ole suositeltava menetelmä absoluuttisen signaalin selvittämiseksi.



Kuva 65. Arvio mittausvirheestä käytettäessä koverasta kultapeilistä mitattua signaalia nollatasona määritettäessä kohteen radianssin absoluuttisia arvoja. Yläosaan on merkitty radianssia vastaavia mustan kappaleen säteilijän lämpötiloja.



Kuva 66. Arviot lukukohinan sekä pimeävirran ja loissäteilyn määrästä kameran eri lämpötiloilla mitattaessa koveraa kultapeiliä ja kohdetta. Peilin tapauksessa Loissäteily + pimeävirta -komponenttiin sisältyy myös peilin ja ilmaisimen emissiosta aiheutuva osuus signaalista.

Mainittakoon, että mittaustuloksia analysoitaessa on herännyt epäily, että työssä käytetyn infrapunakameran valmistajan ilmoittama vaste ei täysin vastaa kameran todellista vastetta. Mikäli kameran todellisessa ja valmistajan ilmoittamassa vasteessa on merkittävää eroa, se vaikuttaa myös joihinkin tässä työssä esitettyihin tuloksiin. Kaikki kohteiden laskennalliset radianssit on määritetty MATLAB-funktiolla, jotka käyttävät valmistajan ilmoittamaa vastetta. Mikäli todellinen vaste ei ole sama kuin valmistajan ilmoittama, se voi selittää vähintään osaksi esimerkiksi erot laskennallisten ja mitattujen radianssin arvojen välillä Kuvassa 40 sekä pienet sovitesuorien vakiotermit Kuvassa 49.

Ennen työn kokeellista vaihetta suoritettua kameran kvantitatiivisessa kalibroinnissa käytettiin integrointiaikoja 100, 500 ja 2000 μs . Kuten luvussa 5.1 esitettiin, alle 140 μs :n integrointiajalla ulostulosignaalin taso laskee epälineaarisesti, mikä tarkoittaa, etteivät 100 μs :n integrointiajalla mitatut digitaalilukuarvot ole lineaarisesti verrattavissa 500 ja 2000 μs :n integrointiajoilla mitattuihin digitaalilukuarvoihin. Tämä on todennäköisesti aiheuttanut pientä virhettä kalibrointikertoimessa, jonka avulla FDRA_radiance_viewer-MATLAB-ohjelma laskee suhteellisia radianssin arvoja, mikä aiheuttaa pientä virhettä ohjelmalla laskettuihin radianssin arvoihin. Jatkossa työssä käytetyn FLIR SC7600 -sarjan kameran kalibroinnissa tulee käyttää ainoastaan yli 140 μs :n (tai alle 80 μs :n) integrointiaikoja.

6.2 Absoluuttisen taivastaustan määrittäminen

Työn kokeellisessa vaiheessa tutkittiin koveran kultapeilin soveltuvuutta absoluuttisen taivastaustan määrittämiseen. Menetelmässä peilistä mitattua signaalia käytettiin signaalin nollatasona. Menetelmällä saatujen tulosten perusteella taivastaustan radianssi kameran vastealueella (2,3 – 5,5 μm) on hieman horisontin tason yläpuolella (3,5° vertikaalikulmalla) merkittävästi, luokkaa 0,15 $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$, pienempi kuin ympäristön lämpöisen mustan kappaleen säteilijän radianssi. Tämä vastaa lämpötilan muutosta noin 9 °C:lla lämpötilassa -20 °C ja noin 3 °C:lla lämpötilassa 0 °C. Kirjallisuudessa esitettyjen tulosten perusteella taas horisontista mitattu infrapuna-alueen radianssi vastaa varsin hyvin ympäristön lämpöisen mustan kappaleen säteilijän radianssia, sillä horisontin tasolla heräte muodostuu suuresta määrästä liki ympäristön lämpöistä ilmaa. Tällöin ilmakerroksen emissiivisyys on käytännössä liki 1 ja läpäisevyys 0. Tämä pätee myös mitattaessa horisontin tasoa varsin korkealta ilmasta. [44, 45] Tälläkin perusteella voidaan siis todeta, että työssä testatulla menetelmällä, jossa signaalin nollataso selvitettiin mittaamalla koveraa kultapeiliä, mitatut absoluuttiset radianssin arvot ovat todellista pienempiä.

Luvussa 6.1 esitettyjen tulosten perusteella voidaan karkeasti arvioida, että taivastaustan todelliset radianssin arvot ovat marraskuussa taivaalta mitattujen tulosten tapauksessa (Kuva 60) noin 0,1 $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ todellisia arvoja pienempiä ja tammikuun tulosten tapauksessa (Kuva 63) noin 0,07 $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ todellisia arvoja pienempiä. Tämä virhearvio huomioiden horisontin tasalta mitatut radianssin arvot vastaavat varsin hyvin ympäristön lämpöisen mustan kappaleen säteilijän radianssin arvoja. Lisäksi 80°:n vertikaalikulmassa taivaalta mitatut arvot vastaavat marraskuun mittauksen tapauksessa likimain -26 °C:n lämpöisen mustan kappaleen säteilijän radianssia ja tammikuun mittauksen tapauksessa noin -36 °C:n lämpöisen mustan kappaleen säteilijän radianssia. Ero horisontin tasan ja 80°:n vertikaalikulmassa mitattujen taivaan radianssien välillä vastasi noin 14 °C:n lämpötilaeroa.

Tässä työssä esitettyjen tulosten mukaan taivaan heräte pienenee, kun vertikaalikulma kasvaa. Tämä vastaa täysin kirjallisuudessa esitettyjä tuloksia. Syy tähän muutokseen radianssissa on, että maata lähellä oleva verrattain lämmin ilmakerros, joka emittoi kameran ilmaisimelle päätyvää säteilyä on pienempi. Tällöin käytännössä lämpimän ilmakerroksen emissiivisyys las-

kee ja läpäisevyys nousee verrattuna pienempiin mittauskulmiin, jolloin aina suurempi osa signaalista on peräisin korkeammalta ilmakehästä, jossa lämpötila on matalampi. Muutokset ovat suurimpia sellaisilla aallonpituusalueilla, joilla ilman absorptio ei ole voimakasta. [45] Kirkkaan ja pilvisen taivaan MWIR- ja LWIR-kaistojen spektraalisia radiansseja eri vertikaalikulmilla on esitetty Bellin *et al.* artikkelissa [45].

Tässä työssä esitettyjen mittaustulosten mukaan (Kuva 60) taivaan ollessa matalalla olevan paksun pilviverhon peitossa, taivaan heräte pysyy likimain vakiona riippumatta mittauskulmasta. Tämä havainto vastaa hyvin kirjallisuudessa esitettyjä tuloksia. Kun ilman suhteellinen kosteus on korkea ja pilvet ovat verrattain lähellä maanpintaa, pilvien radianssi infrapuna-aallonpituusalueella vastaa parin asteen tarkkuudella maanpinnalla olevan ilman lämpöisen mustan kappaleen radianssia. Tämä koskee täysin pilvistä säätä, sillä silloin pilvet ovat matalalla ja liki samassa lämpötilassa maan pinnan tason kanssa. [45, s. 1315] Pilvet myös heijastavat merkittävän määrän maan emittoimaa säteilyä takaisin maanpinnalle [14].

6.3 Suosituksia kenttämittauksiin

Tässä työssä esiteltyjen tulosten perusteella voidaan todeta, että menetelmää, jossa käytetään koveraa kultapeiliä radianssin absoluuttisten arvojen määrittämiseen, voidaan käyttää kenttämittauksissa tietyissä olosuhteissa, lähinnä mitattaessa kylmällä infrapunakameralla kohdetta, joka on kymmeniä asteita kameraa lämpimämpi. Se ei ole kuitenkaan yleisesti pätevä menetelmä radianssin absoluuttisten arvojen määrittämiseen. Kuvassa 65 on esitetty karkea arvio mittaustulosten virheestä kylmällä ja lämpimällä kameralla. Esimerkiksi, jos tavoitteena on 5 % mittaustarkkuus, voidaan 21,8 °C:n lämpöisellä kameralla mitata kohdetta, joka emittoi säteilyä yhtä voimakkaasti kuin 50 °C:n lämpöinen mustan kappaleen säteilijä. Kameran lämpötilalla -19,8 °C taas samaan mittaustarkkuuteen päästään mittaamalla kohdetta, joka emittoi säteilyä yhtä voimakkaasti kuin 10 °C:n lämpöinen mustan kappaleen säteilijä. Muilla absoluuttisen radianssin määrittämiseen soveltuvilla menetelmillä päästään kuitenkin todennäköisesti parempiin tuloksiin.

Työn aikana huomattiin, että lämpimän ilman emissio vaikuttaa mittaustuloksiin merkittävästi lyhyelläkin matkalla. Esimerkiksi mitattaessa spektrometrillä lämpimistä sisätiloista kylmässä ulkoilmassa olevaa ympäristön lämpöistä kohdetta siten, ettäameran ja kohteen välissä oli lämmintä ilmaa vain parin metrin matkalla, mitatussa spektrissä nähtiin selkeä hiilidioksidin emissiopiikki aallonpituuden 4,2 µm kohdalla. Mittauksesta ei saatu tarkempaa dataa spektrometrin jouduttua huoltoon. Voidaan kuitenkin todeta, että kenttämittauksissa tulee välttää tilannetta, jossaameran ja kohteen välillä on ilmaa, jonka lämpötila poikkeaa kohteen ympäristön lämpötilasta. Esimerkiksi kohteen mittaaminen kylmissä olosuhteissa lämpimästä pakettiautosta voi johtaa merkittävään mittaustulosten virheeseen, josameran linssin etupuolella on lämmintä ilmaa.

Työn aikana havaittiin, että ilman säteilyä vaimentavan vaikutuksen tarkka arvioiminen on haastavaa ja se aiheuttaa epävarmuutta mittaustuloksiin. Radianssin absoluuttisten arvojen määrittämisen kannalta potentiaalisin vaihtoehto olisi käyttää nollatason määrittämiseen verrokikohdetta, joka on ympäristön lämpöinen. Tällöin ilman nettovaikutus säteilyn voimakkuuteen

on käytännössä nolla, jolloin ilman vaikutuksien arvioinnista aiheutuva mittausepätaarkkuus pienenee. Lisäksi merkittävä etu käytettäessä ympäristön lämpöistä verrokkia on, että sen pinnasta heijastuva säteily on pääasiassa peräisin saman lämpöisistä kappaleista. Tällöin heijastuva säteily aiheuttaa vain hyvin vähän virhettä, jos verrokin emissiivisyys on arvioitu epätarkasti. Merkittävimpänä haasteena ympäristön lämpöisen verrokin käytössä on sen pinnan pitäminen staabiilina.

Eräs työn tavoite oli kehittää mittausjärjestely, jolla taivaan herätettä voitaisiin mitata tehokkaasti ja hyvällä toistettavuudella. Tässä työssä käytetty tapa käyttää koveraa kultapeiliä verrokkina havaittiin mittausjärjestelyjen kannalta toimivaksi. Peili oli nopeaa kiinnittää alustaan, säätää kohdalleen ja sopivalle etäisyydelle linssistä sekä ennen kaikkea liikuttaa kiskoa pitkin linssin eteen oikeaan kohtaan ja pois sen edestä. Taivaan herätteitä mitatessa havaittiin potentiaalisia kehityskohteita mittauksen toteutustapaan. Vertikaalinen kuvauskulma tulisi kyetä määrittämään paremmin, jotta tiedettäisiin tarkemmin missä kulmassa taivasta kulloinkin kuvataan. Ratkaisu tähän voisi olla esimerkiksi kulma-asteikon liittäminen kameran jalkaan. Jalustan asento tulisi myös pystyä määrittämään mittauksen alussa. Esimerkiksi vesivaa'alla luultavasti päästäisiin riittävään tarkkuuteen.

Määritettäessä taivaan herätettä tietyillä vertikaalikulmilla, tulee kyetä mitata samaa kohtaa kuvaustaajuudesta riippuen noin sekunnin. Kameralla on siis kyettävä kuvaamaan vakaasti tietyllä kulmalla hetken aikaa. Tässä hyödyksi olisi pysäytin, jonka avulla kamera voidaan mittauksen aikana pysäyttää tiettyihin vertikaalikulmiin. Tällöin kyettäisiin nopeasti ja systemaattisesti mittamaan taivasta tietyillä kulmilla saman mittauksen aikana. Jos saman mittauksen aikana mitataan taivasta usealla eri vertikaalikulmalla, jokaisesta kulmasta mitatut kohta videosta pitää kyetä tunnistamaan oikein. Varsin toimiva keino tähän on piirtää kuvaaja taivaan herätteestä ajan funktiona Kuvan 57 tapaan. Tämä keino ei kuitenkaan aina välttämättä toimi, jos esimerkiksi pilvien ja tuulen takia taivaan heräte muuttuu nopeasti ja/tai erot eri vertikaalikulmien välillä ovat pieniä. Vaihtoehto pysäyttimelle on mitata taivaan heräte eri kulmissa aina erillisissä mittauksissa. Tämä on kuitenkin työläämpi vaihtoehto ja jotkin mittaukseen vaikuttavat parametrit saatavat todennäköisemmin muuttua mitausten välillä.

Mittausten tehokkuutta olisi voitu parantaa mittaamalla peiliä ja solumuovia vain ennen kiinnostuksen alaista kohdetta. Tässä työssä peili ja solumuovi mitattiin aina mittauksen aluksi ja lopuksi. Lisäksi mittaamalla peiliä ja solumuovia vain mittauksen alussa videotiedostojen koko olisi ollut paljon pienempi. Syynä tähän oli se, että voitaisiin paremmin arvioida, onko mittauksen aikana tapahtunut tuloksiin vaikuttavia muutoksia. Työn aikana havaittiin, että tyypillisissä mittauksissa merkittäviä muutoksia ei tapahdu. Poikkeuksen tekivät mittaukset, joissa kameran lämpötila muuttui nopeasti mittauksen aikana. Tällöin peili tai verrokin mitaaminen ennen ja jälkeen kohteen mitaamisen on suositeltavaa. Lisäksi suoritettaessa useita minuitteja kestäviä mittauksia, peilin tai verrokin mitaaminen myös mittauksen lopussa on perusteltua.

Jatkossa taivasta mitattaessa olisi vahvasti suositeltavaa mitata jokaisen mittauksen yhteydessä tunnettua verrokkisäteilijää. Näin toimimalla jokaisesta mittauksesta kyettäisiin jälkikäteen määrittämään yksi tunnettu datapiste, jonka avulla muut muiden mitattujen kohteiden signaalien absoluuttiset arvot kyetään määrittämään.

6.4 Jatkotutkimustarpeet

Koveraa kultapeiliä hyödyntävä menetelmä havaittiin työn tulosten perusteella hyvin puutteelliseksi absoluuttisen taivastaustan määrittämiseen. Sen sijaan muita potentiaalisia menetelmiä absoluuttisten signaalien tarkkaan määrittämiseen kannattaisi tutkia tarkemmin. Seuraavissa kahdessa tämän luvun kappaleessa esitellään kaksi kalibroitimenetelmää, joita hyödynnetään taivaan radianssin absoluuttisten arvojen määrittämisessä.

Shaw'n *et al.* artikkelissa [36] mitataan taivaan herätteitä LWIR-kaistan mikrobolometrikameralla on päädytty kalibroitimenetelmään, jossa käytetään kahta mustan kappaleen säteilijää verrokkikohteina. Toinen verrokkikohde on aina 50 °C:n lämpöinen ja toinen ympäristön lämpöinen. Niitä mittaamalla suoritetaan jokaisen mittauksen yhteydessä kalibroitimittaus. Tällä menetelmällä kyetään ekstrapoloimalla varsin tarkasti mittaamaan kylmänkin taivaan absoluuttinen radianssi. [36]

Yksi vaihtoehto olisi käyttää verrokkina hyvin kylmää verrokkikohdetta, jonka heräte tunnetaan varsin tarkasti. Tällöin kylmää taivasta mitatessa ekstrapolointi jäisi parhaassa tapauksessa tarpeettomaksi ja mitattuja signaaleita voitaisiin verrata saman suuruusluokan tunnettuihin arvoihin. Shaw'n ja Fedorin artikkelissa [39] esitetyssä tapauksessa kylmänä verrokkina on käytetty kartion muotoista astiaa, joka on upotettu alkoholiin, jonka lämpötila lasketaan hyvin matalalle upottamalla sinne kuivajäätä. Astiaan puhalletaan typpeä estämään huurteen muodostuminen ja ilmassa olevan veden tiivistyminen. Tällä metodilla päästään kohteen lämpötilaan -65 °C. Korvaamalla alkoholi ja kuivajää nestetypellä, voitaisiin saavuttaa vielä matalampia verrokkikohteen lämpötiloja. [39] Mahdollisesti jopa niin alhaisiin, että verrokista mitattua signaalia voitaisiin onnistuneesti käyttää arvioimaan signaalin nollatasoa. Artikkelissa matalaherätteistä verrokkia ei siis käytetty suoraan signaalin nollatason arvioimiseen, vaan tunnettuna verrokkina kameraa kvantitatiivisesti kalibroitaessa.

Menetelmää, jossa kohteen radianssin absoluuttinen arvo määritetään mittaamalla tunnettua verrattain korkeaherätteistä verrokkisäteilijää (luku 4.2), tutkittiin työn kokeellisessa vaiheessa hyvin rajallisesti. Tulosten perusteella menetelmä vaikutti kuitenkin hyvin lupaavalta. Olisi suositeltavaa, että menetelmän toimivuutta tutkittaisiin jatkossa perusteellisemmin. Etenkin ympäristön lämpöisen verrokkikohteen hyödyntäminen absoluuttisen taivastaustan määrittämiseen on tarkempien jatkotutkimusten arvoinen.

Tässä työssä esitetyt absoluuttisen signaalin määrittämiseen käytetyt menetelmät ovat perustuneet työssä käytetyn kameran vasteen lineaarisuuteen. Eri olosuhteissa suoritettujen mitausten tulosten perusteella vaste tai sitä kuvaava kalibroitikerroin on kuitenkin hieman vaihdellut. Tähän voivat olla syynä mittauksiin liittyvät epävarmuudet, kuten virheet ilman vaikutuksen

arvioinnissa sekä mahdollisesti kameran vasteen poikkeaminen valmistajan ilmoittamasta. Olisi kuitenkin suositeltavaa varmistaa, että kameran vaste todella on lineaarista vähintään sen dynaamisen alueen alapäässä.

Erittäin suositeltavaa olisi myös määrittää kameran todellinen spektraalinen vaste. Mikäli todellinen spektraalinen vaste poikkeaa merkittävästi valmistajan ilmoittamasta vasteesta, se vaikuttaa tässä työssä laskennallisesti määritettyihin radianssin arvoihin. Tällä voi olla merkittävä vaikutus useisiin tässä työssä esitettyihin mittaustuloksiin: esimerkiksi kameran vastetta kuvaavien sovitesuorien kulmakertoimet saattavat muuttua. Täten mikäli kameran spektraalisen vasteen havaitaan poikkeavan merkittävästi valmistajan ilmoittamasta spektraalisesta vasteesta, tulee työssä laskennallisesti määritetyt radianssit määrittää uudelleen sekä uudelleenanalysoida tulokset, jotka perustuvat aiemmin määritettyihin mittaustuloksiin.

7. YHTEENVETO

Pääasiassa kameran komponenteista peräisin olevan loissäteilyn määrän vaihtelu aiheuttaa MWIR-kaistan mittauksissa signaalin nollatason vaihtelua, joka johtaa nykyistä kalibroitimene-
telmää käytettäessä merkittäviin epätarkkuuksiin määritettäessä kohteen radianssin absoluuttisia arvoja. Erityisen haastavaa on tarkkojen arvojen määrittäminen hyvin matalaherätteisistä koh-
teista, kuten pilvettömästä pakkastaivaasta. Loissäteilyn määrän vaihtelu johtuu pääasiassa ka-
meran komponenttien, kuten optiikan ja rungon, lämpötilojen vaihteluista. Mitä lämpimämpiä ka-
meran komponentit ovat, sitä voimakkaampaa loissäteily on. Kameran komponenttien lämpötilan
vaihtelu puolestaan on seurausta ympäröivien olosuhteiden vaihtelusta sekä kameran lämpiämi-
sestä sen käynnistämisen jälkeen.

Loissäteilyn määrän selvittäminen etenkin kenttämittauksissa on haastavaa. Tässä työssä
sen määrää arvioitiin määrittämällä lukukohinan määrä eri integrointiajoilla suoritettavien mittaus-
ten avulla ja mittaamalla samaa kohdetta samoissa olosuhteissa kameran rungon eri lämpötiloilla.
Mittautulosten perusteella kameran rungon lämmitessä 42 °C:lla loissäteilyn määrä kasvaa noin
0,11 Wm⁻²sr⁻¹:lla. Tämä vastaa radianssin muutosta, joka aiheutuu -20 °C:n lämpöisen mustan
kappaleen säteilijän lämpötilan noustessa 5 °C:lla tai 20 °C:n lämpöisen mustan kappaleen sä-
teilijän lämpötilan noustessa noin 2 °C:lla. Työn aikana havaittiin, että loissäteilyn määrää ei voida
luotettavasti arvioida kameran rungon lämpötilan perusteella ainakaan, jos kamera ei ole täysin
stabiloitunut. Mitattaessa on huomioitava, että kamera lämpenee käynnistämisen jälkeen olosuh-
teista riippuen jopa useita tunteja.

Työssä tutkittiin kokeellisesti, voidaanko absoluuttinen taivastausta määrittää riittävällä
tarkkuudella menetelmällä, joka perustuu koveran kultapinnoitetun peilin hyödyntämiseen. Mene-
telmässä signaalin nollataso määritetään mittaamalla koverasta kultapeilistä heijastunutta kame-
ran omaa jäähdytettyä ilmaisinta, jonka heräte on äärimmäisen matala. Eri olosuhteissa suoritet-
tujen radiometrinen mittauksen tulosten perusteella tämä menetelmä ei sovellu absoluuttisen tai-
vastaustan määrittämiseen. Kuitenkin, menetelmän avulla voidaan saavuttaa hyvä mittauksen tark-
kuus mitattaessa kylmällä kameralla suhteellisen korkeaherätteisiä kohteita. Syy menetelmän ra-
joitteisiin on loissäteilyn osuuden voimakas kasvu peiliä mitatessa. Osa kameran emittoimasta
säteilystä heijastuu kameran ilmaisimelle, mikä kasvattaa loissäteilyn voimakkuutta verrattuna ti-
lanteeseen, jossa mitataan jotain muuta kohdetta. Kameran lämpötilan noususta seuraava lois-
säteilyn määrän kasvu on peiliä mitattaessa noin 3 kertaa voimakkaampaa kuin kohdetta mita-
tessa. Kameran lämpötilalla on siis hyvin vahva vaikutus tämän menetelmän käytettävyyteen.
Peilin itsensä lämpötilalla on myös merkitystä, mutta sen vaikutus on vain noin 10 % kameran
lämpötilan vaikutuksesta. Myös kameran rakenne vaikuttaa siihen, kuinka tarkasti signaalin nol-
lataso kyetään määrittämään peilin avulla. Osalla jäähdytetyistä kameroista peili soveltuu nolla-
tason määrittämiseen erittäin huonosti. Tämän työn tulosten perusteella koveraa kultapeiliä ei siis

suositella käytettäväksi absoluuttisten signaalien määrittämiseen, sillä menetelmän toimivuus riippuu hyvin vahvasti olosuhteista ja tilanteesta.

Menetelmää, jossa kohteen radianssin absoluuttinen arvo määritetään mittaamalla tunnettua verrattain korkeaherätteistä verrokkisäteilijää, tutkittiin työn kokeellisessa vaiheessa hyvin rajallisesti. Tulosten perusteella menetelmä vaikutti kuitenkin hyvin lupaavalta. Olisi suositeltavaa, että menetelmän toimivuutta tutkittaisiin jatkossa perusteellisemmin. Etenkin ympäristön lämpöisen verrokkikohteen hyödyntäminen tässä menetelmässä on tarkempien jatkotutkimusten arvoinen.

Työn kokeellisessa vaiheessa taivastaustan radianssin absoluuttisia arvoja määritettiin kovaa kultapeiliä hyödyntävällä menetelmällä. Loissäteilyn voimistumisen takia menetelmän avulla määritetyt radianssin absoluuttiset arvot olivat todellisia arvoja pienempiä. Kun mittausvirhe huomioitiin, horisontin tasan (vertikaalikulma $3,5^\circ$) radianssiksi määritettiin hieman ympäristön lämpöistä mustan kappaleen säteilijän radianssia pienempi arvo. Liki pystysuoraan taivaalta (vertikaalikulma 80°) puolestaan määritettiin radianssin arvoja, jotka vastaavat 14°C horisontin tasaa kylmemmän mustan kappaleen säteilijän radianssia.

Työn merkittäviin tuloksiin lukeutuvat myös kameran toiminnallisuuteen liittyvät havainnot. Erityisen tärkeä havainto oli kameran ulostulosignaalin arvon ja integrointiajan riippuvuuden epälineaarisuusalue alle $140\ \mu\text{s}$:n integrointiajoilla. Välillä $80 - 140\ \mu\text{s}$ lukukohinataso laski digitaali-lukuarvoina noin 180 yksikköä. Sen käytännön vaikutus on, että alle $140\ \mu\text{s}$ integrointiajalla mitattuja tuloksia ei voida suoraan verrata sitä pidemmillä integrointiajoilla mitattuihin tuloksiin. Esimerkiksi kalibrointimittauksissa ei voida käyttää sekä alle että yli $140\ \mu\text{s}$:n (tai $80\ \mu\text{s}$:n) integrointiaikoja tai kalibrointikertoimeen muodostuu virhettä. Suositeltavaa olisi jatkossa suorittaa vastaavanlainen testi muillekin PVTUTKL:n nykyään käytössä oleville sekä tulevaisuudessa hankittaville kameroille, joissa on säädettävä integrointiaika.

Toinen merkittävä havainto oli, että ekstrapoloimalla selvitetty integrointiajan 0 arvot olivat sitä suurempia mitä korkeampiherätteistä kohdetta mitattiin. Todennäköinen syy tälle on se, että integrointiaika on todellisuudessa pidempi kuin asetettu arvo. Tämän oletuksen perusteella työssä käytetyn FLIR SC7600 -sarjan infrapunakameran lukukohinatasoksi määritettiin digitaali-lukuarvo 257.

8. LÄHTEET

- [1] H. Budzier, G. Gerlach, Thermal Infrared Sensors: Theory, Optimisation and Practice, John Wiley & Sons, Incorporated, Hoboken, 2010.
- [2] A. Rogalski, Infrared detectors, 2nd ed. CRC press, 2010.
- [3] E. Hecht, Optics, 4th ed. Addison Wesley Longman, Inc., 2002.
- [4] R.W. Robinett, Quantum Mechanics: Classical Results, Modern Systems, and Visualized Examples, 2nd ed. Oxford university press, 2006.
- [5] R. McCluney, Introduction to Radiometry and Photometry, 2nd ed. Artech house, 2014.
- [6] M. Eismann, Hyperspectral Remote Sensing, SPIE PRESS, 2012.
- [7] Department of Signal Processing and Acoustics: Radiometry, <https://www.aalto.fi/department-of-signal-processing-and-acoustics/radiometry>.
- [8] R.D.J. Hudson, Infrared System Engineering, John Wiley & Sons. Inc., 1969.
- [9] B. Bernard, abc's of Infrared, 1st ed. Howard W. Sams & Co., Inc., 1970.
- [10] T.M. Lillesand, R.W. Kiefer, Remote sensing and image interpretation, 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- [11] Infradex, emissiivisyystaulukot, <https://www.infradex.com/wp-content/uploads/2016/08/emissiivisyys.pdf>.
- [12] J. Kosola, T. Solante, Digitaalinen taistelukenttä, 3 uusittu laitos ed. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos, Helsinki, 2013.
- [13] J.M. Wallace, P.V. Hobbs, Atmospheric Science, 2nd ed. Academic Press as an imprint of Elsevier, 2006.
- [14] K.N. Liou, An Introduction to Atmospheric Radiation, Volume 84, 2nd ed. Elsevier, 2002.
- [15] R.W. Fenn, J.D. Mill, S.A. Clough, L.S. Rothman, W.O. Gallery, E.P. Shettle, R.E. Good, F.E. Volz, F.X. Kneizys, Handbook of Geophysics: Ch 18. Optical and Infrared Properties of the Atmosphere, Air Force Research Laboratory Space Vehicles Directorate Battlespace Environment Division, 1985.
- [16] S.L. Valley, Handbook of Geophysics and Space Environments, McGraw-Hill, New York, 1965.
- [17] Developments in Detector Technologies Committee, National Research Council Staff, Seeing Photons: Progress and Limits of Visible and Infrared Sensor Arrays, National Academies Press, Washington, D.C., 2010.
- [18] M. Vollmer, K.-. Möllmann, Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications, Wiley-VCH GmbH & Co., Weinheim, Germany, 2010.

- [19] I. FLIR Systems, How is NETD of cooled cameras measured? https://flir.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/128/~how-is-netd-of-cooled-cameras-measured%3F.
- [20] I. Dincer, Refrigeration Systems and Applications, John Wiley & Sons, Incorporated, Chichester, 2017.
- [21] A. Jain, Biswas Amiya, Parasitic Flux analysis of cooled Infrared Detectors for Space applications, Defence Science Journal, Vol. 67, 2017, pp. 193-197. <https://publications.drdo.gov.in/ojs/index.php/dsj/article/view/11180>.
- [22] W. Jin, C. Liu, J. Xiu, Infrared nonuniformity correction and radiometric calibration technology using U-shaped blackbody, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2011: Advances in Imaging Detectors and Applications, SPIE.
- [23] T. Orzanowski, Nonuniformity correction algorithm with efficient pixel offset estimation for infrared focal plane arrays, Springerplus, Vol. 5(1), 2016, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5074943/>.
- [24] Y. Tendero, S. Landeau, J. Gilles, Non-Uniformity Correction of Infrared Images by Midway Equalization, Image processing online, Vol. 2, 2012, pp. 134–146. <https://www.ipol.im/pub/art/2012/glmt-mire/article.pdf>.
- [25] FLIR SC7000 Series datasheet, http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/RND_017/RND_017_US.pdf.
- [26] Atomic and Molecular Physics Division, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. HITRAN database, <https://hitran.org/>.
- [27] J. Tarhasaari, Atomi- ja molekyyli-spektritietokantojen hyödyntäminen Matlab-ympäristössä, Tampereen teknillinen yliopisto, 2010.
- [28] C.J. Willers, M.S. Willers, R.A.T. Santos, van der Merwe, P. J., J.J. Calitz, et al., Pyradi: an open-source toolkit for infrared calculation and data processing, 2012, SPIE, Edinburgh, United Kingdom.
- [29] S. Budzan, R. WYŻGOLIK, Remarks on Noise Removal in Infrared Images, Measurement Automation Monitoring, Vol. vol. 61, no. 06, 2015, pp. 187-190. https://yadda.icm.edu.pl/.../Budzan_remarks_MAM_6_2015.pdf.
- [30] Thorlabs: Camera Noise and Temperature Tutorial, https://www.thorlabs.com/new-grouppage9.cfm?objectgroup_id=10773.
- [31] A.K. Sharma, S.K. Sharma, P. Vasistha, J.P. Mangalhara, Effect of Ambient Temperature on Calibration of Cooled Thermal Camera, Defence Science Journal, Vol. 67, 2017, pp. 173-176. <https://publications.drdo.gov.in/ojs/index.php/dsj/article/view/9820>.
- [32] A. Kattinig, S. Thetas, J. Primot, Ensuring long-term stability of infrared camera absolute calibration, Optics express, Optical Society of America, Vol. Vol. 23, No. 14, 2015.
- [33] R. Strakowski, B. Wiecek, A simplified model of parasitic radiation in IR bolometer camera, Measurement Automation Monitoring, Vol. 63, 2017, pp. 94-97.
- [34] A.E. Mudau, C.J. Willers, D. Griffith, le Roux, F. P. J., Non-Uniformity Correction and Bad Pixel Replacement on LWIR and MWIR Images.

- [35] P.A. Jacobs, Thermal infrared characterization of ground targets and backgrounds, 2nd ed. SPIE, 2006.
- [36] J.A. Shaw, P.W. Nugent, N.J. Pust, B. Thurairajah, K. Mizutani, Radiometric cloud imaging with an uncooled microbolometer thermal infrared camera, Optics express, Vol. 13, Iss. 15, 2005, pp. 5807-5817.
- [37] H. McEvoy, G. Machin, R. Simpson, Review of current thermal imaging temperature calibration and evaluation facilities, practices and procedures, across EURAMET (European Association of National Metrology Institutes, 11.-14.06.2012, ResearchGate.
- [38] E.I. Aleshko, A.I. Garaeva, V.I. Kurt, Calibration of blackbody simulators for thermal imaging and pyrometry, Journal of Optical Technology, Vol. Vol. 84, No. 3, 2017, pp. 195-196.
- [39] J.A. Shaw, L.S. Fedor, Improved calibration of infrared radiometers for cloud temperature remote sensing, Optical engineering, Vol. 32, Iss. 5, 1993, pp. 1002-1010.
- [40] FLIR, Cooled versus uncooled cameras for long range surveillance, http://www.flirmedia.com/MMC/CVS/Tech_Notes/TN_0005_EN.pdf.
- [41] X. Maldague, Introduction to NDT by Active Infrared Thermography, Materials evaluation, 2002, http://w3.gel.ulaval.ca/~maldagx/r_1221t.pdf.
- [42] FLIR, gas detection cameras, <https://www.flir.com/browse/industrial/gas-detection-cameras/>.
- [43] Thorlabs: Concave Mirrors: Protected Gold (800 nm - 20 μm), https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6627.
- [44] H.E. Bennett, Bennett, J. M., Nagel, M. R., Distribution of Infrared Radiance over a Clear Sky, JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, Vol. 50, Iss. 2, 1960, pp. 100-106.
- [45] E.E. Bell, L. Eisner, J. Young, R.A. Oetjen, Spectral-Radiance of Sky and Terrain at Wavelengths between 1 and 20 Microns. II. Sky Measurements*, JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, Vol. 50, Iss. 12, pp. 1313-1320.